

Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

Magisterský studijní program: strojírenská technologie

Zaměření: obrábění a montáž

ANALÝZA VLIVU PROCESNÍCH KAPALIN NA ŘEZIVOST BROUSICÍHO KOTOUČE PŘI BROUŠENÍ KONSTRUKČNÍ A NEREZOVÉ OCELI

ANALYSIS OF THE INFLUENCE PROCESS FLUIDS ON THE CUTTING POWER OF GRINDING WHEEL DURING GRINDING OF STRUCTURAL AND STAINLESS STEEL

KOM - 1238

Tomáš Röber

Vedoucí práce:

Prof. Ing. Alexey Popov, DrSc

Konzultant:

Ing. Miloslav Ledvina (KOM)

Počet stran: 74

Počet příloh 26

Počet obrázků: 36

Počet tabulek: 8

Počet grafů: 9

3.9.2013

ANALÝZA Vlivu PROCESNÍCH KAPALIN NA ŘEZIVOST BROUSICÍHO KOTOUČE PŘI BROUŠENÍ KONSTRUKČNÍ A NEREZOVÉ OCELI

ANOTACE:

Práce shrnuje informace o broušení a o procesních kapalinách a jejich vzájemném vlivu. Zabývá se experimentálním měřením, jehož cílem je zhodnotit použitelnost jednotlivých kapalin s ohledem na změnu řezivosti brousicího kotouče a s ohledem na dosaženou drsnost povrchu.

Klíčová slova: BROUŠENÍ, PROCESNÍ KAPALINA, ŘEZIVOST, DRSNOT
POVRCHU, KONSTRUKČNÍ OCEL, NEREZOVÁ OCEL,

ANALYSIS OF THE INFLUENCE PROCESS FLUIDS ON THE CUTTING POWER OF GRINDING WHEEL DURING GRINDING OF STRUCTURAL AND STAINLESS STEEL

ANNOTATION:

This work summarizes information about grinding and about process fluids and their each other influence. It deals with the experimental measurements, which is focused to evaluate the usability of fluids with respect to change cutting power of grinding wheel and with respect to reached surface roughness.

Keywords: GRINDING, PROCESS FLUID, CUTTING POWER, SURFACE
ROUGHNESS, STRUCTURAL STEEL, STAINLESS STEEL

Zpracovatel: TU v Liberci, KOM

Dokončeno: 2013

Archivní označ. zprávy:

Počet stran:	74
Počet příloh:	26
Počet obrázků:	36
Počet tabulek:	8
Počet diagramů:	9

MÍSTOPŘÍSEŽNÉ PROHLÁŠENÍ

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 3.9.2013

Podpis:



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jméno a příjmení : **Tomáš R Ů B E R**
Studijní program : M2301 Strojní inženýrství
Obor : 2303T002 Strojírenská technologie
Zaměření : Obrábění a montáž

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje diplomová práce na téma:

Analýza vlivu procesních kapalin na řezivost brousicího kotouče při broušení konstrukční a nerezové oceli

Zásady pro vypracování :

(uveďte hlavní cíle bakalářské práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Shrnutí poznatků o klasifikaci procesních kapalin pro obrábění, vlastnosti a charakteristiky procesních kapalin.
2. Shrnutí poznatků o vlivu procesních kapalin na technologie dokončovacího obrábění.
3. Návrh metodiky experimentů pro zkoumání vlivu procesních kapalin na řezivost brousicího kotouče a kvalitu obrobených součástí při broušení konstrukční a nerezové oceli.
4. Realizace experimentů.
5. Porovnávání řezivosti brousicího kotouče a drsnosti obrobeného povrchu při použití různých procesních kapalin.
6. Shrnutí a zhodnocení dosažených výsledků a vyvození závěrů.



Forma zpracování diplomové práce:

- průvodní zpráva: 50 - 60 stran textu
- grafické práce: obrázky, tabulky a grafy - dle potřeby

Seznam literatury (uved'te doporučenou odbornou literaturu):

1. MÁDL, J. *Řezné kapaliny v současné technologii obrábění*. In: Sborník vědeckých prací. 1. vyd. Ekologie obrábění, Strojírenská technologie knihovnička, 2000, s. 9 - 18. ISBN 80-7044-232-8.
2. MASLOV, J. N. *Teorie broušení kovů*. 1.vyd. Praha: SNTL 1979. 246 s.
3. KOČMAN, K., PROKOP, J. *Technologie obrábění*. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM Brno, s.r.o., prosinec 2005. 270 s. ISBN 80-214-3068-0.
4. HOLEŠOVSKÝ, F., DUŠÁK, K., JERSÁK, J., aj. *Terminologie obrábění a montáže*. 1. vyd. Ústí nad Labem: Univerzita J. E. Purkyně, ÚTRV, 2005. 208 s. ISBN 80-7044-616-1.

Vedoucí diplomové práce:

Prof. Ing. Alexey Popov, DrSc.

Konzultant diplomové práce:

Ing. Miloslav Ledvina

Doc. Ing. Jan Jersák, CSc.
vedoucí katedry



Doc. Ing. Miroslav Malý, CSc.
děkan

V Liberci, dne 12.12.2012

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto vedoucímu práce Prof. Ing. Alexeyi Popovovi, DrSc. a Bc. Anetě Pošvové za cenné rady a připomínky při vypracování diplomové práce. Ing. Miloslavu Ledvinovi a Ing. Jaroslavu Votočkovi za pomoc s prováděným experimentálním měřením.

Obsah

Obsah.....	7
Úvod.....	9
1 Teoretické poznatky o broušení	11
1.1 Technologická charakteristika broušení	11
1.1.1 Znaky typické pro broušení	12
1.1.2 Výhody použití broušení.....	13
1.1.3 Základní způsoby broušení	14
1.2 Brousicí nástroj	16
1.2.1 Tvorba třísky při záběru jednotlivého zrna.....	18
1.2.2 Opotřebení brousicích zrn.....	19
1.2.3 Řezivost brousicího nástroje	20
1.2.4 Tepelné jevy při broušení	23
2 Shrnutí poznatků o klasifikaci procesních kapalin pro obrábění, vlastnosti a charakteristiky procesních kapalin.....	25
2.1 Technologické požadavky na řezné kapaliny	25
2.2 Druhy řezných kapalin.....	28
2.3 Přívod řezného média do místa řezu.....	30
3 Shrnutí poznatků o vlivu procesních kapalin na technologie dokončovacího obrábění.....	33
3.1 Vliv na řezný nástroj	33
3.2 Vliv na obráběný materiál.....	33
3.3 Vliv na kvalitu obrobeného povrchu	34
3.4 Vliv použité technologie	36
4 Návrh metodiky experimentů pro zkoumání vlivu procesních kapalin na řezivost brousicího kotouče a kvalitu obrobených součástí při broušení konstrukční a nerezové oceli	37
4.1 Měření řezivosti	37
4.1.1 Postup měření řezivosti.....	37
4.1.1 Postup vyhodnocení měření drsnosti povrchu	38
4.2 Měření kvality povrchu.....	41
4.2.1 Postup měření drsnosti povrchu.....	41
4.2.2 Postup vyhodnocení měření drsnosti povrchu	41

5	Realizace experimentů	44
5.1	Broušené materiály použité při měření	44
5.1.1	Nízkolegovaná ocel třídy 14	44
5.1.2	Nerezová ocel třídy 17	45
5.2	Parametry broušení	46
5.2.1	Brousicí nástroj	46
5.2.2	Obráběcí stroj	46
5.3	Procesní kapaliny použité při měření	48
5.4	Měření řezivosti	50
5.4.1	Přístroje a nástroje pro měření řezivosti	50
5.4.2	Průběh měření řezivosti	51
5.5	Měření drsnosti povrchu	55
5.5.1	Přístroje použité pro měření drsnosti povrchu	56
5.5.2	Průběh měření drsnosti povrchu	58
6	Porovnání řezivosti brousicího kotouče a drsnosti obrobeného povrchu při použití různých procesních kapalin	60
6.1	Porovnání řezných sil	60
6.2	Porovnání drsnosti povrchu	63
7	Shrnutí a zhodnocení dosažených výsledků a vyvození závěrů	66
8	Seznam použitých zdrojů	68
9	Seznam použitých obrázků	70
10	Seznam grafů	71
11	Seznam tabulek	72
12	Seznam příloh	73

Úvod

První poznatky o broušení, jakožto způsobu obrábění, spadají do mladší doby kamenné. V této době je broušení používáno k jednoduchým ručním operacím, jako například obrušování různých nástrojů o kameny nebo křemenný písek. V dobách středověku se broušení používalo zejména k ostření či leštění nástrojů, zbraní a zbrojí [12].

Velký rozvoj broušení nastal až v roce 1859 s vynálezem umělého brousicího kotouče a dále v roce 1860 se sestrojením prvních univerzálních brusek. S rozvojem obrobků a nástrojů ze slinutých karbidů, jejichž broušení bylo velmi obtížné, se začínají objevovat a používat obráběcí nástroje z přírodního diamantu. V hlavních strojírenských závodech byly diamantové brousicí nástroje použity nejdříve pro dokončovací broušení nástrojů s břity ze slinutého karbidu. Tam, kde to bylo ekonomicky výhodné, byl pak pro slinuté karbidy zaveden výhradně tento způsob broušení. Také při výrobě přesných součástí z velmi tvrdých materiálů se s ohledem na stále stoupající požadavky na jejich přesnost a kvalitu povrchu začaly ve velké míře používat diamantové nástroje [12].

Zavedení brousicích kotoučů se zrnem z kubického nitridu boru umožnilo efektivně brousit různé železné materiály, hlavně vysokolegované oceli. V současné době se strojní součásti často obrábějí s přesností na zlomky mikrometru a s drsností povrchu řádově desetin až setin mikrometru, čehož se dosahuje hlavně broušením a dalším dokončovacím obráběním (honováním, lapováním, superfinišováním) [12].

V dnešní době tvoří broušení cca 20-25% celkového strojního obrábění [14]. Z těchto důvodů si broušení udržuje, a předpokládá se, že i do budoucna udrží, své uplatnění.

Tato diplomová práce je zaměřena na experimentální testy vlivu procesní kapaliny na řezivost brousicího kotouče při broušení konstrukční a nerezové oceli. Práce je rozdělena na dvě části.

První část, část teoretická, se věnuje přiblížení a využitelnosti procesu broušení, problematice z hlediska použití procesních kapalin a okolnostmi, které tento proces ovlivňují.

V druhé části diplomové práce, části praktické, je sepsána charakteristika zkušebních materiálů a souhrn procesních kapalin, které jsou použity při samotném experimentu. V druhé části je také navržena metodika, pomocí které se bude posuzovat vyhodnocení procesních kapalin, dále samotný popis provedeního měření, porovnání jednotlivých procesních kapalin a vyhodnocení výsledků a vhodnosti jednotlivých kapalin.

1 Teoretické poznatky o broušení

Broušení je hromadné rychlostní mikrořezání (odírání) povrchových vrstev broušeného tělesa velmi jemnými zrna brusiva, scelenými pojivem v nástroj. Proces probíhá při velikých rychlostech, nejběžněji však do 50ms^{-1} , ve zvláštních případech i více [12]. Hlavní řezný pohyb je obvykle rotační a vykonává jej nástroj. Broušení je především určeno pro vytváření přesných rovinných ploch a válcových ploch vnitřních i vnějších. Dále se broušením dají vytvářet kuželové plochy a plochy obecného tvaru [4]. Broušením se dosahují velké přesnosti obrábění, ale může se používat i k méně obvyklým operacím, jako je například čištění odlitků, výkovků apod. [12].

1.1 Technologická charakteristika broušení

Broušení se v mnoha stránkách podobá procesu opotřebování součástí při tření. Liší se však od něj následujícím [12]:

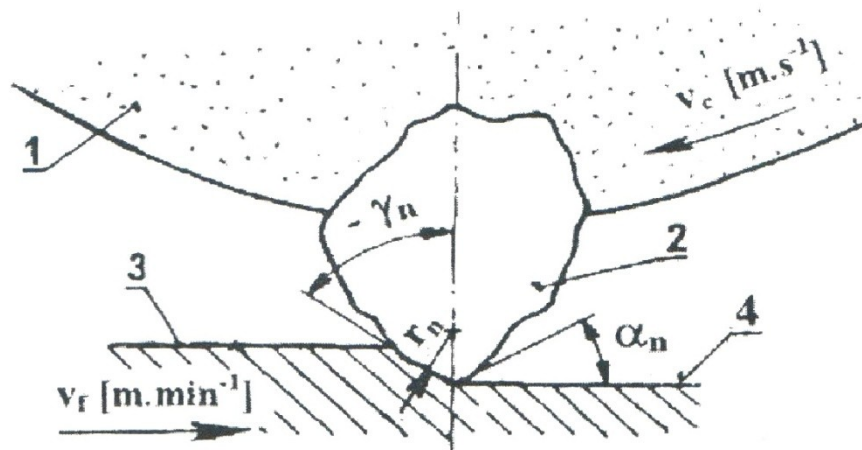
- V porovnání s povrchem běžného třecího tělesa je pracovní plocha broušícího nástroje mnohem drsnější.
- Brusiva jsou velmi tvrdá, odolná proti vysokým teplotám a odolná proti opotřebování při relativně velké křehkosti. Zároveň však zrna brusiva snesou při broušení velké měrné zatížení.
- Broušení zabezpečuje intenzivní úběr materiálu za časovou jednotku a jemné třísky, tvořící se při broušení, jsou mnohem větší v porovnání s částicemi vznikajícími při otěru.
- Při běžném režimu práce kotouče se odebírané třísky zpravidla odvádějí z místa řezu.

Z konvenčních obráběcích procesů se broušení nejvíce podobá frézování. Při broušení ovšem dochází k jistým kvalitativním a kvantitativním rozdílům, jenž souvisí hlavně s vlastnostmi broušícího kotouče a s řeznými podmínkami. Od běžných způsobů obrábění se dále odlišuje schopností tzv. samoostření. Tato schopnost úzce souvisí s poměrně málo pevným ukotvením broušícího zrna ve vazbě broušícího nástroje a s tvrdostí, ale zároveň křehkostí broušícího zrna [6].

1.1.1 Znaky typické pro broušení

Mezi jednotlivými způsoby obrábění kovů není zásadní rozdíl, protože tvorba třísek na jednotlivých řezných plochách různými obráběcími nástroji probíhá vždy stejně, nezávisle na konstrukci a tvaru nástroje. Ve všech případech je řezání postupný smyk nebo kluz jednotlivých částic – třísek, způsobovaný klínem, na který působí určitá řezná síla. Tento popis přibližně platí i pro broušení kovů. Přesto má broušení jisté zvláštnosti, jimiž se podstatně liší od obrábění kovovým nástrojem [12]:

- Brousicí zrna jsou po ploše nástroje rozmístěna nepravidelně. Dochází k nerovnoměrnému úběru třísky.
- Různorodost geometrického tvaru brousicích zrn. Úhel zrna se mění, téměř vždy bývá záporný, nepravidelné poloměry zaoblení ostří (setiny až desetiny mikrometrů), negativní úhel čela a poměrně velký úhel hřbetu (viz Obr. 1).
- Každé zrno brusiva působí na obráběnou plochu dynamicky, což zvyšuje okamžitou teplotu v místě brusu.
- V průběhu broušení jsou hrany vyčnívajících ostrých zrn vystaveny větším nárazům, než hrany zrn méně vyčnívajících či zaoblených. Tím se ostré hrany otupují a prostor mezi výčnělky zrn se ucpává třískami – dochází ke ztrátě řezivosti. Tato se následně obnovuje použitím orovnávačů.
- Díky vysokým řezným rychlostem dochází jen ke krátké době záběru brousicího zrna s obrobkem.
- Řez je přerušovaný a třísky mají malý a proměnlivý průřez. V důsledku velkých plastických deformací a tření třísky dochází k vysokým teplotám (až 1500°C). Vysoká teplota vede k tomu, že se některé třísky roztaví a shoří (jiskření).
- Brousicí nástroj je mnohabřitý, tzn. má nedefinovaný počet břitů s nedefinovanou geometrií [4].



Obr. 1 Model záběru broušícího zrna [6]

v_c – řezná rychlost; v_f – posuvová rychlost; γ_n – normální úhel čela;

α_n – normální úhel břitu; r_n – poloměr zaoblení ostří;

1 – broušící kotouč; 2 – broušící zrna; 3 – obráběná plocha;

4 – obrobená plocha

1.1.2 Výhody použití broušení

Broušení je stěžejní technologií při výrobě pokročilých výrobků a povrchů s širokou oblastí působení. Běžně se používá tam, kde je třeba splnění alespoň jednoho z následujících požadavků [12]:

- **Vysoká přesnost** – broušením se běžně dosahuje velmi vysokých přesností a geometrických tolerancí, proto se uplatňuje při dokončovacích operacích. Broušením lze vyrábět součásti od nepatrných rozměrů, jakými jsou např. jehly, valivá ložiska, kontaktní čočky, až po velké součásti, např. styčné plochy pohyblivých prvků obráběcích strojů.
- **Obrábění tvrdých materiálů** – jednou z výhod broušení je i schopnost obrábět tvrdé materiály a kalené povrchy. V některých případech se tedy broušení stává jediným způsobem výroby součástí s těmito vlastnostmi. Díky stále narůstajícímu využití řezné keramiky a jiných tvrdých materiálů se schopnost obrábět tyto materiály stává u broušení jednou z klíčových.
- **Drsnost povrchu** - další z nesporných výhod broušení je kvalita obrobeného povrchu, ať se již jedná o povrch vyžadovaný designem nebo povrch funkční

povahy. Povrchy s požadavkem na drsnost povrchu u povrchů funkční povahy obvykle souvisí s požadavkem na vysokou přesnost.

1.1.3 Základní způsoby broušení

Nezákladnějšími způsoby rozdělení broušení, jak ukazuje Obr. 2 a Obr. 3, je rozdělení dle aktivní části broušícího kotouče na [6]:

- obvodové – broušení obvodem kotouče.
- čelní – broušení plochou kolmou k ose kotouče.

Dalšími rozděleními můžeme specifikovat tvar a způsob jakým docílíme obrobeného povrchu [6]:

- rovinné broušení – výsledkem je rovinná plocha.
- broušení do kulata – výsledkem je rotační povrch.
- broušení na otáčivém stole – broušení s rotačním posuvem.
- tvarovací broušení – broušení závitů, ozubených kol apod.
- kopírovací broušení – broušení s řízenou změnou posuvu/přísuvu, NC stroje.
- broušení tvarovacími broušícími kotouči – profil kotouče určuje výsledný profil obrobku.

Dle vzájemné polohy broušícího kotouče a obrobku lze broušení dělit na [6]:

- vnější – broušení vnějšího povrchu obrobku.
- vnitřní – broušení vnitřního povrchu obrobku.

Dle hlavního pohybu posuvu stolu vzhledem k broušícímu kotouči [6]:

- axiální broušení – hlavní posuv stolu je rovnoběžný s osou kotouče.
- tangenciální broušení – hlavní posuv stolu je rovnoběžný s vektorem obvodové rychlosti kotouče ve zvoleném bodě.
- radiální broušení – hlavní posuv stolu ve zvoleném bodě je radiální vzhledem ke kotouči.
- čelní zápichové broušení – posuv stolu je plynulý axiální.

BROUŠENÍ OBVODOVÉ				
		radiální	tangenciální	axiální
Rovinné – pohyb stolu	přímocárý			
	otáčivý			
Do kulata	vnější			
	vnitřní			

Obr. 2 Vybrané způsoby obvodového broušení [6]

n_s – frekvence otáčení brousícího kotouče; n_w – frekvence otáčení obrobku;

v_{fa} – axiální rychlost posuvu stolu; v_{fr} – radiální rychlost posuvu stolu;

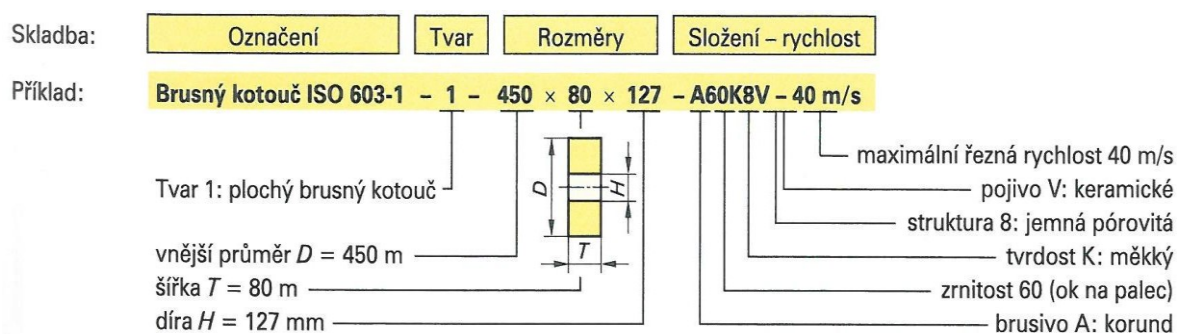
v_{ft} – tangenciální rychlost posuvu stolu

BROUŠENÍ ČELNÍ				
		radiální	tangenciální	axiální
Rovinné – pohyb stolu	přímocárý			
	otáčivý			

Obr. 3 Vybrané způsoby čelního broušení [6]

1.2 Brousicí nástroj

Jde o řezný nástroj, který se skládá ze zrn brusiva stmelených v celek pojivem. Základními tvary mohou být kotouče, segmenty, brousicí tělíska nebo např. pásy s pružným podkladem. Brousicí nástroj je, dle normy, charakterizován několika parametry (viz Obr. 4): geometrickým tvarem a jeho rozměry, druhem brusiva, zrnitostí, tvrdostí, strukturou a pojivem. Někdy se udává i maximální řezná rychlost.



Obr. 4 Označení brousicího kotouče dle ČSN ISO 525 [2]

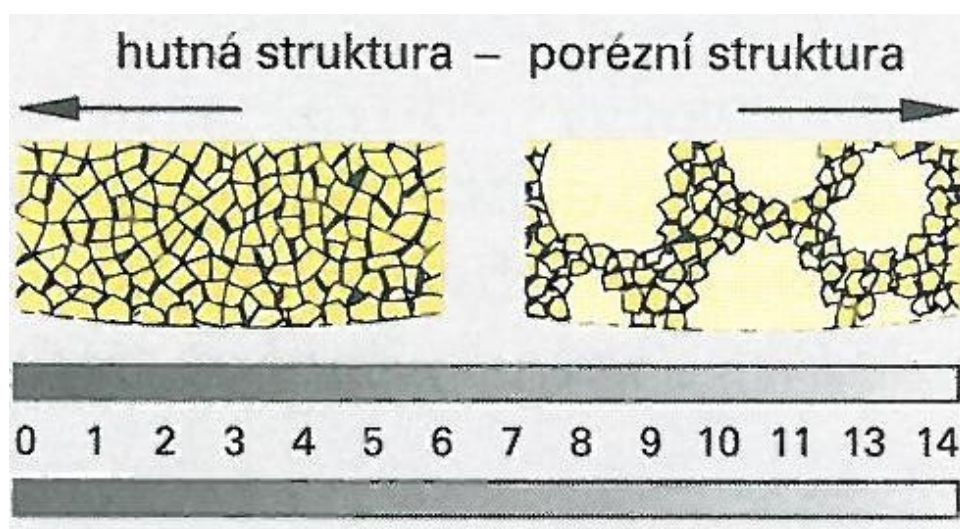
Brusivo je základním prvkem brusného nástroje. Existují přírodní a syntetická brusiva. Mezi přírodní patří například diamant, smírek, korund či křemen. Mezi syntetická patří umělý diamant, kubický nitrid boru, elektrokorund, karbid boru nebo karbid křemíku. Při volbě brusiva, a následně řezného nástroje, je nutné dodržet, aby tvrdost tohoto brusiva byla nejméně 1,5 až 2 krát vyšší, než tvrdost broušeného materiálu. Dále je vhodné, aby brusivo bylo při vysokých teplotách chemicky inertní vůči broušenému materiálu [12].

Zrnitost je hodnota, která charakterizuje velikost zrn brusiva. Je udávána číslem, které odpovídá maximálnímu počtu ok síta na palec délky hrany síta, kterým bylo zrno proseto. Zrnitost brusiva přímo ovlivňuje hodnotu dosažitelné drsnosti povrchu obráběného materiálu. Pro co nejnižší drsnost je třeba použít brusivo co nejjemnější zrnitosti. Spolu s nižší drsností, jemnější zrnitost přináší i ostřejší břity broušených nástrojů [2].

Tvrdost brousicího nástroje je myšlena soudržnost tohoto nástroje, tzn. mechanický odpor proti vylamování zrn. Obvykle platí, že pro broušení tvrdých materiálů je nutno použít nástroje s měkkým (pružným) pojivem, které zabraňuje velkým rázovým silám, aby vylamovaly celá zrna. K těmto silám dochází v důsledku velkého otěru zrn, který zajišťuje samoostření. Broušení měkkých materiálů vyžaduje velkou třísku a velkou řeznou sílu, proto se zde používají nástroje s pevným (tvrdým) pojivem. Pro určení vhodné tvrdosti je

třeba brát v úvahu, že při použití příliš měkkého nástroje dochází k rychlému opotřebení a tudíž k nárůstu ekonomické náročnosti. Zrna se zde totiž vylamují dříve, než dojde k vybroušení plochy s velkým třecím odporem. Brusný nástroj s nízkou tvrdostí nezachovává svůj tvar. Naopak u příliš vysoké tvrdosti nástroje dochází k otupení brusného zrna, které se následně nevylomí. Zrno se dále na obrobku maže a materiál leští. Při tomto stavu dochází k nárůstu tlaku a teploty v místě kontaktu nástroje s obrobkem [2].

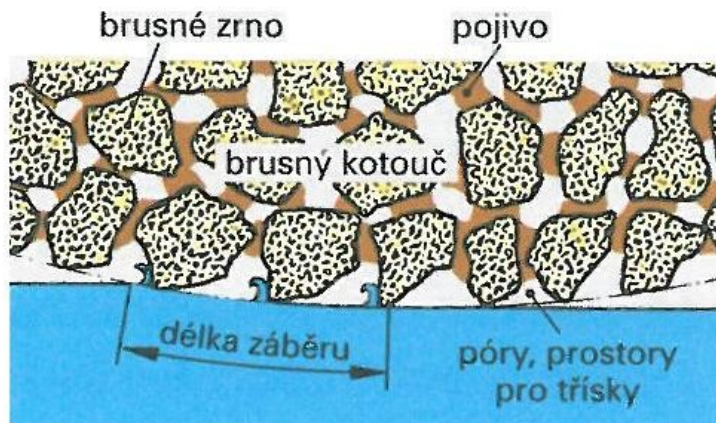
Struktura označuje poměr brusiva, pojiva a volného prostoru, označovaného také jako póry, v objemové struktuře brousicího nástroje. Póry podporují chlazení při obrábění a také tvoří prostor, kterým se odvádí třísky od obrobku. Pokud jsou póry příliš malé, dochází často k jejich ucpání třískami a tím stoupá tlak a teplota při procesu broušení. Označení struktury se udává čísla v rozsahu od 1 do 14, kdy nejnižší číslo označuje strukturu hrubou a velmi hutnou a nejvyšší číslo naopak strukturu velmi jemnou a zvláště pórovitou. Při broušení, které vyžaduje větší množství odebraných třísek, se využívá velmi pórovitých struktur [2].



Obr. 5 Označení struktury [2]

Pojivo brusných zrn má za úkol uchovat vcelku brusný nástroj a na jeho povrchu udržet zrna brusiva do té doby, než se otupí. Poté musí pojivo povolit, aby umožnilo otupenému brusnému zrně vylomení z brousicího nástroje. Druh použitého pojiva následně ovlivňuje i vhodnou oblast použití nástroje. Keramická pojiva se často používají při hrubování i hlazení ocelí korundovým či karborundovým brusivem. Brousicí nástroje s keramickým pojivem jsou porézní a velmi dobře se ostří diamantovým orovnávacím nástrojem. Pojiva z umělé pryskyřice zesílené vláknem se nejčastěji používají pro hrubování nebo rozbrušování a vysokotlaké broušení se zirkonovým korundem, profilové

broušení s diamanty a nitridem bóru. Předností pojiv z umělé pryskyřice je, že chrání svou elasticitou zrna brusiva před přetížením a tím umožňují dosažení vyšších řezných sil. Dalšími, i když ne tak často používanými druhy pojiv, jsou pojiva kovová, pryžová zesílená vláknem nebo galvanické spojení, které vzniká za použití galvanické lázně [2].

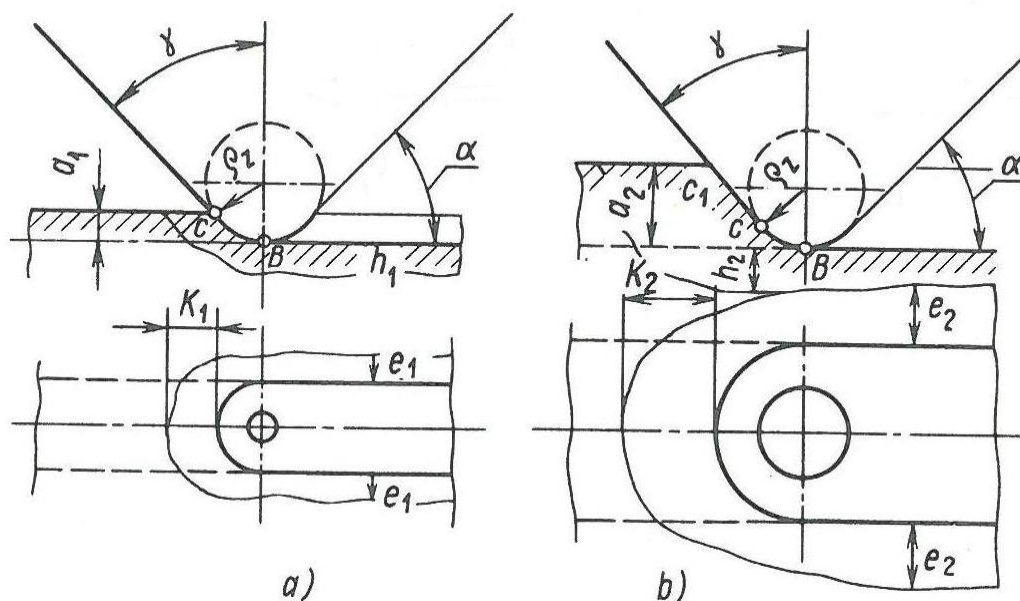


Obr. 6 Struktura brusného kotouče [2]

1.2.1 Tvorba třísky při záběru jednotlivého zrna

Při procesu broušení odebírají zrna brusiva povrchovou vrstvu materiálu společně, a proto výzkum záběru jednotlivého zrna vede hlavně ke zkoumání mechanismu mikrořezání (odírání). Schéma procesu odírání je znázorněno na Obr. 7. Zaoblený vrchol řezného elementu s poloměrem ρ_z zajišťuje vysokou mechanickou pevnost břitu a velké skutečné úhly řezu, pokud jsou splněny předpoklady že $F_c > F_f$. Při procesu oděru se kov před (k_1 , k_2 na Obr. 7), pod (h_1 , h_2 na Obr. 7) a po stranách (e_1 , e_2 na Obr. 7) řezné částice plasticky deformuje. Čím je větší hloubka záběru, tím je rozsah plastických deformací vyšší, a to ve všech třech zmíněných směrech [12].

Zrno brusiva se může pohybovat a odebírat třísku pouze, pokud je smykové napětí, které při procesu broušení vzniká, větší než pevnost ve smyku obráběného materiálu [12].



Obr. 7 Schéma procesu mikrořezání v případě zaobleného řezného elementu [12]

a – malá tloušťka třísky, b – velká tloušťka třísky, $\rho_z = \text{konst.}$

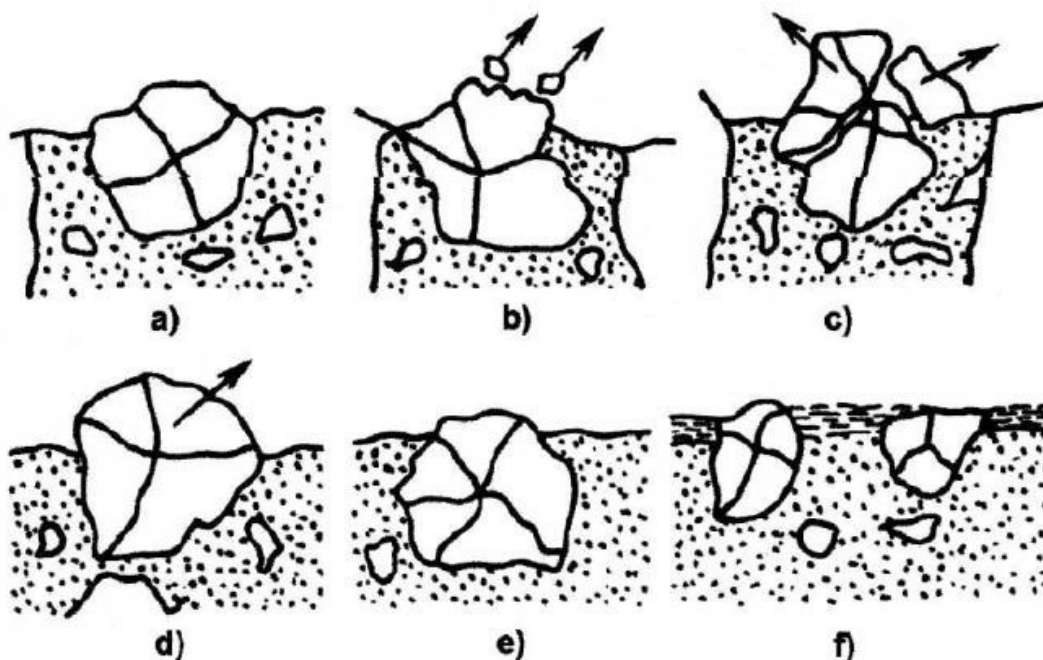
1.2.2 Opotřebení brousicích zrn

V průběhu procesu broušení se brousicí nástroj postupně opotřebovává, což vede ke změnám provozních podmínek, snížení jeho schopnosti odebírat třísku a ke zhoršení dosažitelné jakosti povrchu. Opotřebení funkční části kotouče je komplexní, fyzikálně chemický a mechanický proces, který je ovlivňován veškerými podmínkami brousicího procesu [12]. Dle charakteru nástroje a dle řezných podmínek může docházet k otupování brusných zrn nebo k samoostření brousicího nástroje nebo k obojímu současně (z pohledu nástroje jako celku).

Otupení nastává zaoblováním, štěpením a vylamováním brusných zrn, čímž nástroj ztrácí řezné vlastnosti. K samoostření dochází díky postupnému otupování brusných zrn a jejich následnému vylamování z pojiva při nárůstu řezného odporu. Poté, co se brusné zrno z pojiva vylomí, dojde i k vydrolení tohoto přebytečného pojiva a tím se dostávají do záběru nová brusná zrna, takže se plocha nástroje neustále obnovuje. Pro většinu brousicích nástrojů je tato schopnost typická.

Podle podmínek broušení můžeme rozlišovat mezi těmito základními druhy opotřebení (viz Obr. 8) [12]:

- Otěr řezných částí zrn brusiva se vznikem více či méně hladkých plošek.
- Mikroskopické porušování (štěpení) zrn.
- Porušování celých zrn z pojiva.
- Úplné vylamování zrn z pojiva.
- Porušení působením chemických vlivů ve styčném pásu zrna a obráběného materiálu při vysokých teplotách vznikajících v zóně broušení.
- Zanášení prostorů mezi zrny (pórů) třískami a brusným odpadem.



Obr. 8 Základní způsoby opotřebení brousicího kotouče [12]

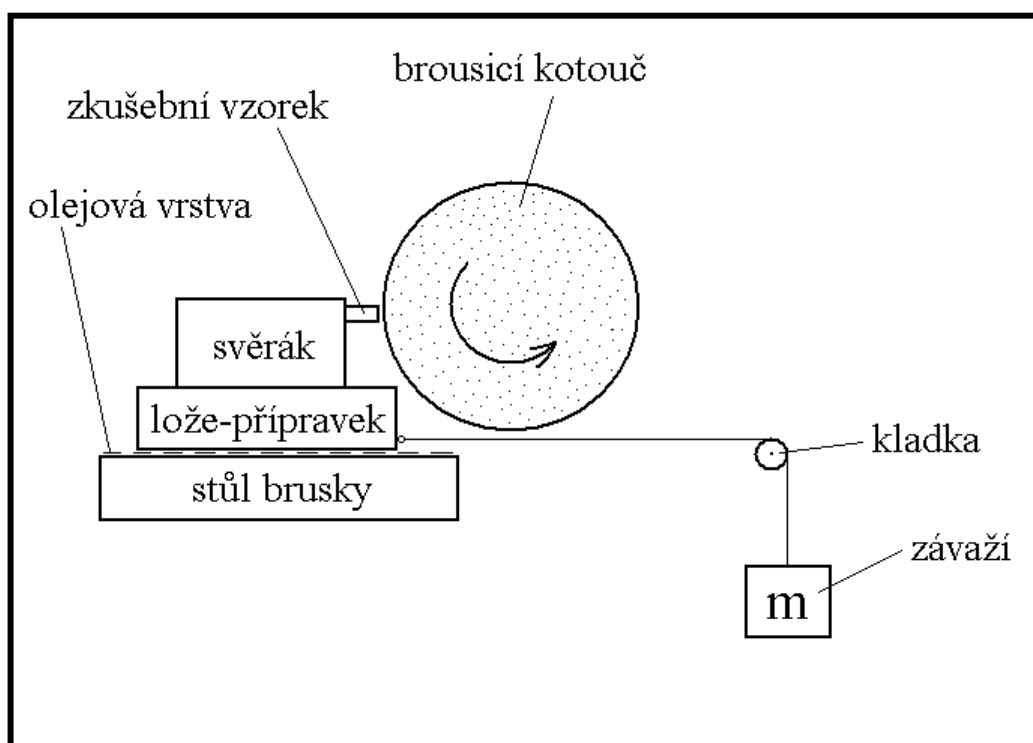
V jeden okamžik může nástroj vykazovat i několik druhů opotřebení, ale je obvyklé, že jeden z výše zmíněných způsobů převládá.

1.2.3 Řezivost brousicího nástroje

Řezivost nástroje lze charakterizovat jako souhrn vlastností, které umožňuje nástroji efektivním způsobem odebrat třísku z obráběného materiálu za daných technologických podmínek. Kritériem řezivosti je v převážné míře intenzita opotřebení břitu při konkrétních řezných podmínkách, tedy odolnost proti mechanickému a tepelnému namáhání [15].

Řezivost je **relativní** charakteristika [15] a jako takovou ji lze porovnávat pouze vůči jiné řezivosti zjištěné za naprosto stejných podmínek s jednou jedinou změnou např. změna materiálu kotouče při zachování průměru kotouče, řezných podmínek, obráběném materiálu apod. vede ke zjištění, který z materiálů povede k lepší řezivosti za daných podmínek.

Charakteristickou zkouškou řezivosti používanou ve světovém průmyslu je zkouška řezivosti úbytkem materiálu (Obr. 9). Tato zkouška probíhá následovně. Broušený materiál se před obráběním zváží a po stanovenou dobu se brousí dle schématu na Obr. 9 stanovenými řeznými podmínkami. Poté se zváží podruhé. Stejný proces se provede se stejným materiálem za stejných podmínek a stejné doby broušení jako v předchozím případě, ale např. při použití procesní kapaliny (důležité je, že se smí změnit pouze jedna veličina rozhodná pro obrábění). Poměr rozdílů hmotností mezi vážením před a po obrábění hodnocené zkoušky a etalonové zkoušky je označen jako index řezivosti i_R .



Obr. 9 Světově používaná zkouška řezivosti

$$\Delta M = M_1 - M_2$$

$$\Delta M_{ET} = M_{1ET} - M_{2ET}, \text{ kde}$$

$$i_R = \frac{\Delta M}{\Delta M_{ET}}$$

M_1 výchozí hmotnost vzorku.

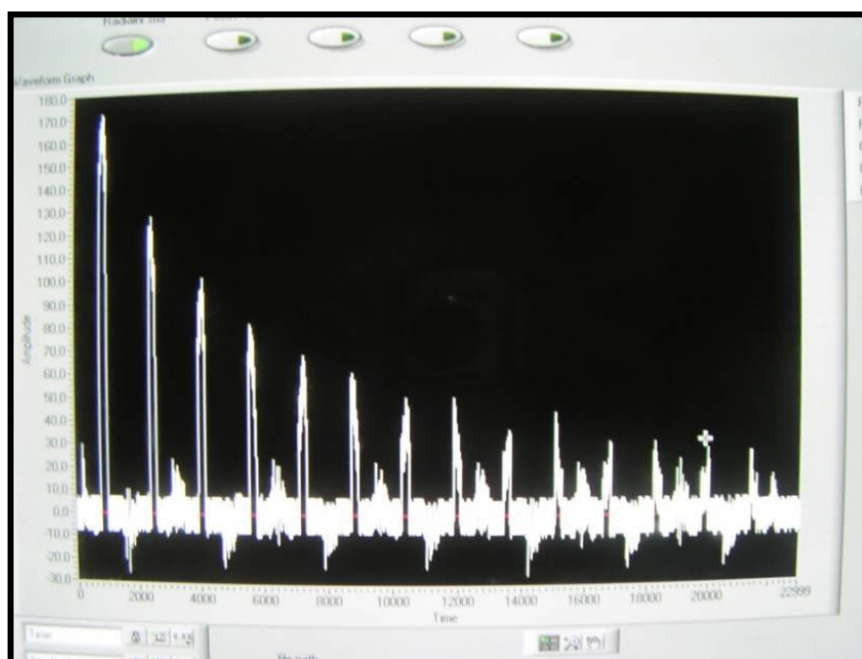
M_2 hmotnost vzorku po obrábění.

M_{1ET} výchozí hmotnost vzorku etalonové zkoušky.

M_{2ET} hmotnost vzorku etalonové zkoušky po obrábění.

i_R index řezivosti.

Na katedře obrábění a montáže, fakulty strojní TUL se používá zkouška řezivosti vyhodnocovaná z vyjiskřovací křivky (Obr. 11), která se zkonstruuje ze záznamu řezných sil (Obr. 10) při broušení.



Obr. 10 Ukázka záznamu vyjiskřovací křivky [15]

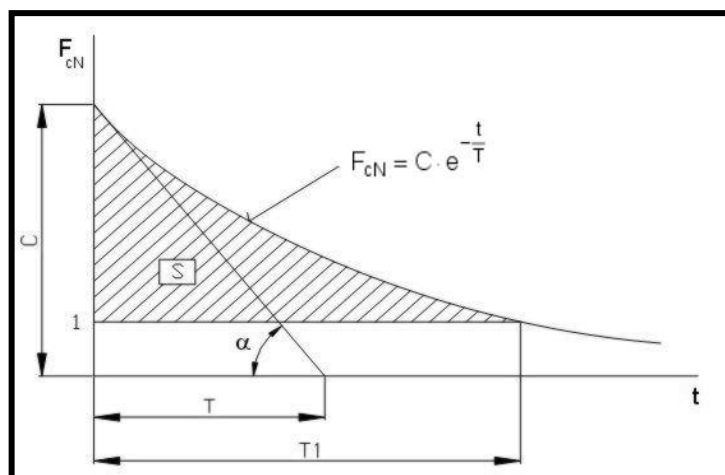
Pro vyhodnocení řezivosti se používá kritérium strmosti práce U (čím vyšší U , tím vyšší řezivost) získané z vyjiskřovací křivky dle vzorce:

$$U = \frac{10^5 \cdot \operatorname{tg} \alpha}{S}$$

$\operatorname{tg} \alpha$ směrnice vyjiskřovací křivky

S plocha pod vyjiskřovací křivkou

U kritérium strmosti práce



Obr. 11 Vyjikhřovací křivka [15]

1.2.4 Tepelné jevy při broušení

Při procesu mikrořezání vznikají v povrchové vrstvě broušeného obrobku místa s vysokými teplotami, díky nimž prudce stoupá teplota povrchové vrstvy. Při použití řezné kapaliny se tento proces projevuje prudkým nárůstem teploty, krátkým setrváním na této teplotě a prudkým ochlazením. Při broušení dochází k masivní přeměně mechanické práce na teplo. Dochází sice také k využití energie na přeměnu krystalické mřížky obráběného materiálu, ale množství této energie činí jen zanedbatelnou část [7].

Teplo, které při procesu vzniká, přechází do obrobku, nástroje, třísky, řezné kapaliny a okolního prostředí. Největší část vzniklého tepla (cca 80%) přechází do obrobku [9], oproti tomu nejmenší část se sáláním přenáší do okolního prostředí. Vysoké teploty při broušení mohou mít za následek defekty povrchové vrstvy (opal, trhliny apod.) a následné znehodnocení obrobku, současně může docházet k tepelné dilataci obráběného materiálu, který změnou rozměrů zvýší velikost odebírané třísky. Díky této změně dochází k dalšímu navýšení tepla vzniklého při obrábění. V extrémních případech může nastat situace, kdy je tepelná dilatace materiálu taková, že vede až k zastavení nástroje nebo dokonce poškození stroje. Z těchto důvodů se tepelný vliv broušení stává jedním z hlavních činitelů.

S pomocí diferenciální rovnice vedení tepla v pevných látkách lze provést simulaci šíření tepla v obrobku [7].

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \lambda \cdot \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right), \text{ kde } \lambda \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \text{ je koeficient tepelné vodivosti}$$

broušeného materiálu.

Hustota proudění tepla ϕ přecházejícího z místa řezu do obrobku je pak [7]:

$$\phi = \frac{Q \cdot q_w \cdot 10^4}{A_D} = \frac{C}{f_a^{0,47} \cdot a_e^{0,47}} \cdot v_c \cdot q_w \cdot 10^4,$$

kde:	Q	množství tepla vznikajícího při broušení [J·s ⁻¹]
	q _w	množství tepla přecházejícího do obrobku [%]
	A _D	jmenovitá plocha řezu [mm ²]
	f _a	příčný posuv [mm·zdvih ⁻¹]
	a _e	radiální řez broušenou plochou [mm]
	v _c	řezná rychlost na obvodu kotouče [m·s ⁻¹]

2 Shrnutí poznatků o klasifikaci procesních kapalin pro obrábění, vlastnosti a charakteristiky procesních kapalin

Prostředí v zóně řezu má významný vliv nejen na kvalitativní a ekonomické parametry procesu, ale umožňuje i broušení materiálů, které se běžně brousí jen velmi obtížně. Běžně používaná řezná média jsou plyny, mlhy a nejčastěji kapaliny[6].

2.1 Technologické požadavky na řezné kapaliny

Z technologického a provozního hlediska se na řezné kapaliny specifikují určité požadavky, k nimž patří zejména chladicí, mazací, čistící a ochranný účinek, provozní stálost, zdravotní nezávadnost a přiměřené náklady [6]. Kombinace chladicího, mazacího a čistícího účinku řezného prostředí zvyšuje produktivitu broušení a současně tyto tři účinky přispívají ke zlepšení kvality broušené plochy [12].

- **Chladicí účinek** je schopnost řezného prostředí odvádět teplo z místa řezu. Tento odvod tepla je realizován tím, že řezné prostředí obklopuje nástroj, třísku i obrobek a přejímá část vzniklého tepla. Chladicí účinek prostředí závisí zejména na vlastnostech, jakými jsou smáčivost, výparné teplo, rychlost vypařování, měrné teplo a tepelná vodivost. Neméně důležité je ovšem i průtočné množství média [6].
- **Mazací účinek** je vyjádřen schopností prostředí vytvářet na povrchu nástroje a obrobku vrstvu, která zvyšuje tření a brání přímému styku kovových povrchů. Mazací schopnost řezného média má za následek zmenšení řezných sil, a tedy snížení spotřeby energie, a také zlepšení jakosti obrobeného povrchu. Mazací účinek řezného média závisí na viskozitě a na pevnosti vytvořené mezní vrstvy. Při příliš vysoké viskozitě, se ovšem zhoršuje schopnost média proniknout mezi styčné plochy, zhoršuje se proudění média a také odvod tepla. Viskóznější řezné médium ulpívá také více na třískách a tím dochází k poměrně velikým ztrátám [6].

- **Čistící účinek** řezného prostředí znamená, že přísun média odstraňuje třísky z oblasti řezu a zlepšuje mj. vlastnosti brousicího kotouče tím, že vyplavuje zanesené póry. Dalším smyslem řezného média je bránit slepování třísek vzniklých při obrábění, čímž se usnadňuje jejich usazování [6].
- **Ochranný účinek** řezného média se projevuje tím, že nenapadá kovy a nezpůsobuje korozi, což je důležitý požadavek, jelikož odstraňuje nutnost konzervace výrobku mezi jednotlivými operacemi, a současně proto, aby byly obráběcí stroje chráněny před korozí, poškozením gumových těsnění nebo poškozením nátěru obráběcích strojů. Pro vytvoření mnohem lepšího antikorozního účinku se přidávají pasivační přísady [6].
- **Provozní stálost** je možné hodnotit dobou výměny řezného prostředí. Doba, po kterou není nutno řezné médium měnit je podmíněna garancí, že se jeho vlastnosti nebudou po tuto dobu měnit. Hlavním důsledkem stárnutí je zhoršení funkčních vlastností řezného média, jeho rozklad, zhoršení mazacích účinků, ztráta ochranných schopností, koroze nebo hnilobný rozklad. Stárnutí řezného média se může projevit pryskyřičnými usazeninami, způsobujícími až poruchy stroje [3].
- **Zdravotní nezávadnost** je požadavek, vycházející z toho, že při práci s řezným médiem přichází médium do styku s pracovníky. Proto nesmí být toto médium zdraví škodlivé, nesmí obsahovat látky, které dráždí sliznici nebo pokožku a nesmí být jedovaté. Dále nesmí řezné médium zamořovat ovzduší nepříjemným zápachem. Zdravotní nezávadnost ovšem závisí i na provozní stálosti a čistotě řezného média [6].
- **Přiměřené náklady** souvisí zejména se spotřebou řezného média. Při zvažování nákladů je nutné posoudit vliv na proces obrábění (trvanlivost nástroje, ostření, kvalitu obrobku a spotřebu energie). Po tomto zvážení následuje zhodnocení na základě provozní stálosti, spotřebě a době výměny. Při tomto zhodnocení je nutné brát v potaz i např. náklady na likvidaci řezného média. Z hlediska hospodárnosti obráběcího procesu je využití řezného média jedním z prostředků, jak lze tuto hospodárnost ovlivnit. Při výběru řezného média je nutné zvážit všechny ovlivňující faktory, kterými jsou např. průběh plastických deformací v oblasti řezu, opotřebování nástroje, změna struktury povrchu obrobené plochy atd. [6].

Např. náklady na nákup a likvidaci řezných kapalin ve strojírenství v Německu činí v průměru 15% výrobních nákladů na obráběné součástky [3].

V posledních letech je ovšem jedním z požadavků, který vystupuje do popředí, dbát na ekologický vliv používání řezných kapalin. Existuje několik možných ekologických řešení např. [11]:

- **Suché obrábění** je obrábění bez použití řezných kapalin. Tato metoda je jednou z možných cest zlepšení ekologie strojírenské výroby. Je ovšem akceptovatelná pouze tehdy, jsou-li zajištěny stejné kvalitativní parametry výroby a stejné nebo nižší výrobní náklady, jako při obrábění s řeznou kapalinou.
- **Snížení množství řezné kapaliny** je použitelné u technologií, které kladou důraz spíše na mazací vlastnosti řezné kapaliny. Jinou variantou je použití u systémů s přídavnou filtrací a chlazením kapaliny, která odplavuje třísku a tím i chladí obráběný materiál.
- **Nasazení alternativních pomocných látek ekologického typu** složené ze základních, přídavných a doprovodných látek. Základními složkami mohou být přírodní a umělé uhlovodíky, syntetické a rostlinné estery, polyglykoly, voda nebo směsi těchto látek.
- **Multifunkční oleje** plní funkci řezných kapalin, hydraulických olejů, převodových olejů nebo olejů pro mazání vodících ploch. Pro obtížnost realizace produktu, který by splňoval odlišné požadavky na tyto oleje, se nasazuje alternativní kapalina, která je koncipována na stejné bázi, ale její viskozita se liší v závislosti na funkci, kterou má plnit.
- **Řezné kapaliny vytvářející méně emisí** jsou kapaliny, které jsou méně náchylné na tvorbu aerosolů a par vznikajících při kontaktu kapaliny se zónou řezu. Jako základové oleje jsou vhodné např. modifikované estery.
- **Zlepšení podmínek pro nasazení** je dosaženo především použitím uzavřeného oběhu pomocných látek s regenerací, odsáváním, filtrací emisí a uzavřením pracovního prostoru a zlepšení péče o pomocné látky.
- **Náhrada technologických metod** je použitelná, pokud se naskýtá možnost místo jedné technologie obrábění použít jinou metodu, např. řezání vnitřních závitů je někdy možné nahradit frézováním, broušení je v některých případech nahraditelné soustružením kubickým nitridem boru apod.

2.2 Druhy řezných kapalin

Řezné kapaliny lze členit na kapaliny s majoritním chladicím účinkem a na kapaliny s majoritním mazacím účinkem. Kapaliny s převážujícím chladicím účinkem jsou kapaliny na vodní bázi a kapaliny s převážujícím mazacím účinkem jsou kapaliny na bázi oleje. V dnešní době ovšem toto rozdělení nevystihuje zcela přesně druhy řezných kapalin, jelikož se stále projevuje snaha o zlepšení mazacích účinků u kapalin s převážujícím chladicím účinkem a stejně tak o zlepšení chladicích účinků u kapalin s převážujícím mazacím účinkem. Díky této snaze dochází k jakémusi vyrovnání rozdílů mezi oběma druhy [6].

Dle P. A. Rebinděra a jeho spolupracovníků bylo dokázáno, že přidají-li se do řezné kapaliny povrchově aktivní látky, zvyšuje se účinnost disperze tuhého tělesa a produktivita obrábění, protože při klasické deformaci dochází k absorpčnímu účinku. Značný vliv má i tzv. „klínový“ účinek řezné kapaliny, který zjistil B. V. Děrjagin. Tento účinek spočívá v tom, že i při velkém měrném zatížení zrna pronikají velmi tenké vrstvy kapaliny do mikroskopických trhlinek a kapilár povrchové vrstvy, a tím usnadňují další tvorbu trhlinek – disperzi obráběného materiálu [12].

Obecně lze procesní kapaliny rozdělit dle složení na následující skupiny: vodné roztoky, emulzní kapaliny, řezné oleje a syntetické a polysyntetické kapaliny [6].

- **Vodné roztoky** jsou nejjednodušší řezné kapaliny, ale mají spíše více nevýhod, než výhod. Jelikož je jejich základem voda, vyžadují tyto roztoky řadu úprav, jako např. změkčování, přidávání přísad proti korozi, přísady pro zlepšení smáčivosti a pro snížení pěnivosti. Vodné roztoky musí být vždy alkalické. U roztoků s vodním základem vzniká nebezpečí anaerobních bakterií způsobujících tvorbu kalů a nepříjemný zápach. I přes veškeré nevýhody se vodné roztoky používají pro svou schopnost velmi dobře odvádět z místa řezu teplo a kvůli čisticím účinkům.
- **Emulzní kapaliny** tvoří disperzní systém dvou vzájemně nerozpustných tekutin, přičemž jedna tvoří velmi drobné kapky, které jsou rozptýlené v tekutině druhé. Nejběžněji se jedná o olej rozptýlený ve vodě. U emulzních kapalin je třeba využít další složky, tzv. emulgátory, jež zabraňují shlukování drobně rozptýlených částic. Tyto přísady snižují mezipovrchové pnutí emulgovaných tekutin a současně se přidávají z důvodu ustálení emulze. Emulzní kapaliny slučují, alespoň do určité míry, výhody vody a mazacích olejů. Chladicí efekt emulzních kapalin

je odvislý od koncentrace emulze. Se vzrůstající koncentrací emulgační přísady ubývá ovšem schopnosti odvádět teplo z místa řezu. Nicméně tato závislost je dána i koncentrací a vlastnostmi emulgačního prostředku. Antikorozní účinek emulzní kapaliny závisí na hodnotě pH, ale hodnota pH tuto schopnost ovlivňuje v podstatně menší míře než u vodných roztoků. Emulzní kapaliny jsou jedny z nejčastěji používaných řezných kapalin.

- **Řezné oleje** jsou zušlechtěné minerální oleje. Mazací schopnosti a tlaková únosnost se u řezných olejů navyšuje díky použití přísad, kterými mohou být mastné látky, organické sloučeniny a pevná maziva. Charakteristika těchto možných přísad je následující:
 - Mastné látky jsou zmýdelnitelné mastné oleje, mastné kapaliny nebo umělé estery. Pokud se nepoužijí za extrémních tlaků, tyto přísady vylepšují mazací schopnosti a přilnavost oleje ke kovu.
 - Organické sloučeniny se osvědčily jako vysokotlaké přísady, které na povrchu vytvářejí vrstvu kovových mýdel. Tato vrstvička zabraňuje kovovým svarům a snižuje tření. Schopnost snižování tření u sloučenin s chlorem klesá při teplotách nad 400°C. Jako nejlepší možnost se projevila kombinace sloučenin síry, chlóru a fosforu.
 - Pevná maziva tvoří, díky své afinitě ke kovu, mezní vrstvu, která je odolná proti tlakům a zlepšuje mazací schopnost oleje. Jejich velkým handicapem je, že se v kapalinách nerozpouští a musí se tedy udržovat v rozptýleném stavu. Mezi pevná maziva patří grafit či sirník molybdenu.
- **Syntetické a polosyntetické kapaliny** jsou druhem řezných kapalin, který se vyznačuje velkou provozní stálostí. Zejména se jedná o látky rozpustné ve vodě a mající dobré chladicí, mazací a ochranné účinky. Syntetické řezné kapaliny jsou složeny z rozpouštědel, tj. glykolů, které ve vodě emulgují nebo se ve vodě rozpouští. Jelikož jsou glykoly průsvitné, je možné pozorovat průběh obráběcího děje. V současné době jsou již vyvinuty syntetické kapaliny se zlepšenými mazacími a antikorozními vlastnostmi.

Na rozdíl od kapalin na bázi oleje, mají syntetické řezné kapaliny nesporné ekonomické výhody. Ve srovnání s kapalinami na bázi oleje, jsou to rychlejší chladicí a dobrý čisticí účinek a jednodušší příprava. Polosyntetické řezné kapaliny vznikají přidáním a rozptýlením oleje v syntetické kapalině, čímž se

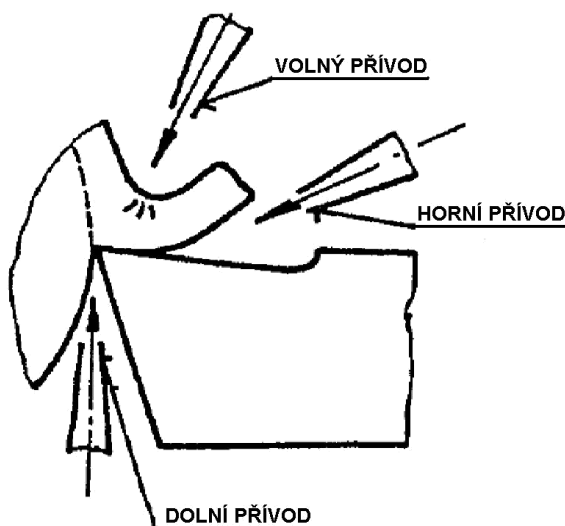
zlepší mazací schopnosti. Částice oleje jsou v těchto kapalinách podstatně menší, než v kapalinách emulzních.

2.3 Přívod řezného média do místa řezu

Ač má druh a složení řezného média při obrábění nemalý vliv, nelze opomenout způsob přívodu média do místa řezu. Nevhodně zvolený způsob přívodu kapaliny může mít za následek neefektivní využití řezného média, v krajních případech dokonce jeho absenci přímo v místě řezu [14].

Existuje několik metod přívodu řezného média do místa řezu. Nejběžnějšími metodami jsou standardní chlazení, tlakové chlazení, podchlazování řezné kapaliny, chlazení řeznou mlhou, vnitřní chlazení a chlazení plynným řezným médiem [6], [14].

- **Standardní chlazení** je metoda přívodu řezného média, která nepotřebuje žádnou úpravu přívodního potrubí a vystačí si se soustavou dodávanou výrobcem ke každému obráběcímu stroji. Soustava chladicího zařízení je tvořena nádobou na řeznou kapalinu, čerpadlem a potrubními rozvody. Průtok řezného média je dán typem čerpadla a může být omezen škrticím ventilem. Místa přívodu řezného média u ortogonálního řezání jsou naznačena na obrázku.

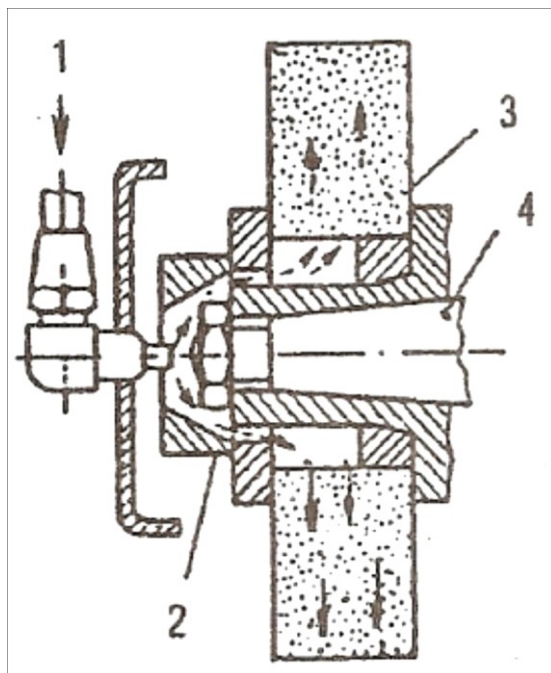


Obr. 12 Přívod řezné kapaliny do místa řezu [6]

- **Tlakové chlazení** je přívod řezné kapaliny k místu řezu pod vysokým tlakem, který se pohybuje v rozmezí od 0,3 do 3 MPa při výstupním průměru trysky 0,3

až 1 mm. Obvykle je řezné médium přiváděno zdola na břit nástroje, přímo na působíště řezných sil. Tato metoda chlazení je využitelná zejména tam, kde má teplo zaručeně špatný vliv na trvanlivost nástroje. Jednou z nevýhod této metody je, že se médium rozstříkuje a tím tvoří mlhu, kvůli které je třeba řešit vhodným způsobem zakrytí pracovního prostoru, aby se zabránilo znečištění pracovního prostředí.

- **Podchlazování řezné kapaliny** na teplotu nižší, než je teplota okolního prostředí, což vede k prodloužení trvanlivosti nástrojů. Vzhledem k zachování mazacích schopností se u běžných druhů řezných médií může podchlazovat až na teplotu 5 – 7°C, u olejů pak na 15 – 20°C. Při nižších teplotách může u olejů docházet k houstnutí a u emulzí k omezení stálosti. Pro snížení teplot pod bod mrazu je nutné použít řezné médium jiného složení, ale tato úprava může mít za následek nárůst výkonu při obrábění.
- **Chlazení řeznou mlhou** je metoda, při níž se řezná kapalina rozptýlí tlakem vzduchu, vytékajícího z trysky rychlostí až 300 m·s⁻¹. Jelikož rozpínající se vzduch obsahuje drobné částičky řezné kapaliny a tím má vyšší schopnost přejímat teplo, dosahuje se použitím tohoto chlazení velmi dobrého odvodu tepla z místa řezu. Současně se navyšuje výkon obrábění a dochází k úspoře řezné kapaliny.
- **Vnitřní chlazení** je metoda přívodu řezné kapaliny do místa řezu, která přináší nemalý nárůst výkonu obrábění. Použití této metody u některých způsobů obrábění může vést k navýšení řezné rychlosti i o 5 – 15%, ke zvýšení výkonu a k lepšímu odvodu třísek z místa řezu. Nejčastěji se této metody používá u soustružení nebo vrtání hlubokých děr a těžkoobrobitelných materiálů. I u broušení je metoda vnitřního chlazení použitelná. Řezná kapalina je přiváděna do příruby broušícího kotouče a díky působení odstředivé síly postupuje kapalina přes póry v kotouči až do místa styku broušícího kotouče s obrobkem (Obr. 13). Velkou předností při použití vnitřního chlazení, je zlepšení dosažené drsnosti povrchu a prodloužení trvanlivosti nástroje. Nevýhodou pak je zvýšení nároku na dokonalé čištění řezné kapaliny (zejména při použití u broušení).



Obr. 13 Vnitřní chlazení brousícího kotouče [6]

1 – přívod kapaliny; 2 – příruba; 3 – brusný kotouč; 4 – vřeteno

- **Chlazení plynným řezným prostředím** není běžně použitelné, jelikož při podchlazování vzduchu nedochází k žádným patrným úsporám. Chlazení stlačeným CO_2 sice přináší zvýšení výkonu obrábění zejména u těžkoobrobitelných materiálů, ale zároveň má řadu nevýhod. Předně jsou to vysoké náklady jednak na CO_2 a také navýšení nákladů kvůli nutnosti odsávání a větrání pracoviště. Nezanedbatelné je i a zvýšené nebezpečí při použití CO_2 . Poněkud zvláštním, ale velmi rozšířeným, případem chlazení plynným prostředím je „nepoužití“ externího chladicího média. Jde o tzv. suché obrábění a soustava obrobek-nástroj je chlazená atmosférickým vzduchem. S významným vývojem řezných materiálů, se metoda suchého obrábění uplatňuje čím dál častěji a výhodněji.

3 Shrnutí poznatků o vlivu procesních kapalin na technologie dokončovacího obrábění

3.1 Vliv na řezný nástroj

Při volbě řezného materiálu se zohledňuje prováděná operace, objem výroby, druh obráběcího stroje i vlastností obráběného materiálu. Použití a typ procesní kapaliny jsou jedny z informací, které mohou volbu řezného nástroje ovlivnit [6].

Jednou z důležitých příčin poškození nástroje je teplo. Přítomnost tepla ovlivňuje trvanlivost i pevnost nástroje, což se projeví jeho opotřebením na čele i na hřbetě. Řezné prostředí, které působí na proces odvodu tepla i snížení tření, způsobí i prodloužení trvanlivosti nástroje [6].

Z nejběžnějších nástrojových materiálů můžeme vyjmenovat například rychlořezné oceli, slinuté karbidy nebo keramiku. U nástrojů z rychlořezné oceli se musí chladit zejména tehdy, kdy proces obráběcí operace probíhá za ztížených řezných podmínek. Slinuté karbidy, které jsou nejrozšířenějším nástrojovým materiálem, umožňují pracovat i bez chlazení. Jelikož je jejich použití časté i na obráběcích centrech, kde se používají spolu s nástroji z rychlořezné oceli, je nutné použití procesních kapalin i u slinutých karbidů. Obráběcí nástroje z keramiky není nutné chladit [5], [6].

3.2 Vliv na obráběný materiál

Při výběru procesní kapaliny z hlediska obráběného materiálu je obvyklé řídit se následujícími pravidly.

Pokud se zvětšuje pevnost obráběného materiálu, nastává větší namáhání nástroje, plastická deformace je vyšší a z tohoto důvodu je nutné volit procesní kapalinu s obsahem oleje a EP aditiv (vysokotlaké vlastnosti) [9] nebo kapalinu o vyšší koncentraci. Tím se zvýší pevnost mazací vrstvy při vyšších teplotách [6].

Materiály, které jsou křehké, jako např. litina, se dobře obrábí za sucha. Použití procesní kapaliny je v těchto případech využíváno spíše z důvodu zamezení šíření nečistot.

U všech materiálů je potřeba sledovat, aby vybraná procesní kapalina nevedla k reakci s obráběným materiálem. Chemická struktura materiálu, zvláště oceli, určuje jeho charakteristiku v širokém rozpětí. Je ovšem možné provést jakési zjednodušení těchto vlastností dle složek, kterými je tvořena základní slitina [6].

Nerezavějící oceli se obrábí obtížně. Zvláštní příměsi do procesních kapalin umožňují dosáhnout jakostního povrchu obráběné plochy a také podstatně zvýšit řeznou rychlost. Hliníkové slitiny se všeobecně obrábí snadno a to i bez použití chladicích a mazacích vlastností procesních kapalin. Přesto se u těchto materiálů při některých operacích vyžaduje přívod procesní kapaliny, především z důvodů dosažení lepší jakosti obráběné plochy [6].

Hořčíkové slitiny mají velmi dobrou obrobiteľnosť a při jejich obrábění se dosahuje vysoké jakosti povrchu, ale jelikož se jedná o chemicky aktivní kov, měla by procesní kapalina obsahovat méně než 0,2 hmotnostního procenta volné kyseliny a nesmí obsahovat žádnou vodu [6].

Na všech automatech se běžně používají materiály s dobrou obrobiteľností, jelikož je zde nutné, aby se tříska od základního materiálu dobře oddělovala a nedocházelo tím k ucpávání prostoru řezání. Z těchto důvodů se i na automatech používá přívodu procesní kapaliny [6].

3.3 Vliv na kvalitu obrobeného povrchu

Významnou schopností procesní kapaliny je její účinek na jakost obráběné plochy. Procesní kapalina může působit na rozměrovou i na tvarovou přesnost a také na drsnost povrchu. Při broušení je kladen velký důraz na čistotu procesní kapaliny, která se udržuje pomocí filtračních příslušenství [9], [14].

Použití procesní kapaliny má za následek změnu objemu plasticky deformované oblasti a odstranění tvorby nárůstku na čele nástroje, což se následně projevuje i na výsledné drsnosti povrchu [9].

Výsledky zkoušek drsnosti prováděných při obrábění ukazují, že přísady působící na zlepšení řezného účinku přispívají k dosažení lepších výsledků dosahované drsnosti. Také vyšší koncentrace (např. emulzí) vykazují kladný vliv na výslednou drsnost povrchu. Zkoušky procesních kapalin potvrdily, že správně zvolená a připravená procesní kapalina může zlepšit drsnost povrchu o 1 až 2 třídy oproti zkouškám za sucha [5].

Vliv procesních kapalin se projeví i na fyzikálním stavu povrchové vrstvy obrobku. Obvykle se při přívodu procesní kapaliny zmenšuje hloubka zpevněné vrstvy. Podle některých autorů se přívodem emulze zmenšila hloubka zpevněné vrstvy o 34% a při přívodu oleje o 44% [14].

Jedním z ukazatelů stupně zpevnění povrchové vrstvy, který je použitelný v praxi, je srovnání tvrdosti materiálu před obráběním a po obrobení. Běžně se tato tvrdost pohybuje v rozmezí 2 až 3krát vyšším než u materiálu výchozího. Při obrábění s použitím procesní kapaliny se tento rozdíl sníží [14].

Dalším důsledkem změn vlastností povrchové vrstvy při obrábění jsou zbytková napětí. Tato napětí, často spojována s fázovými přeměnami, jsou vyvolána plastickou deformací povrchové vrstvy za působení teploty řezání. V závislosti na charakteru energetického působení mohou být tato napětí tlaková nebo tahová. Působení mechanických sil vyvolává v povrchové vrstvě tlaková napětí. Přívodem procesní kapaliny dojde ke snižování teploty během řezání a tím následně k ovlivnění zbytkových tahových napětí. Díky zmenšení tření vlivem mazacích účinků kapaliny dojde k snížení řezné síly a tak i k ovlivnění tlakového napětí [5].

Při obrábění materiálu, u kterého dochází k velkému zpevnění, má přívod procesní kapaliny ještě příznivější vliv na vznik napětí v povrchové vrstvě tím, že je snižuje. To se projevuje i při obrábění nástroji s negativním úhlem čela. Pokud bylo při obrábění bez chlazení zbytkové napětí tahové, pak se po přívodu kapaliny změnilo na tlakové. Tlaková napětí jsou výhodnější s ohledem na namáhání součástí a její únavovou pevnost [5].

Je také nutno podotknout, že teplo vyvolané při řezání může mít vliv i na uvolňování napětí vznikajícího při řezání. Mezi těmito procesy vytváření a uvolňování napětí nastává určitá rovnováha a její porušení poté vede k růstu jednoho nebo druhého typu napětí [5].

3.4 Vliv použité technologie

Přibližné nastínění požadavku na chladicí resp. mazací účinek řezného prostředí v závislosti na použité technologii obrábění je zobrazen na Obr. 14. Z obrázku je patrné, že požadavky na procesní kapaliny se mohou diametrálně lišit pro např. protahování a broušení. I u broušení je drobný rozdíl při požadavcích na procesní kapaliny pro broušení obvodové a broušení bezhroté.

V praxi se takovýto drobný rozdíl obvykle zanedbává a pro jednu technologii obrábění se běžně používá jedna procesní kapalina. V některých případech je používána jedna kapalina i pro vícero technologií. Tyto důvody jsou ovšem ve většině takovýchto případů spíše ekonomického charakteru.



Obr. 14 Požadavek na chladicí/mazací účinek kapaliny v závislosti na typu obrábění [9]

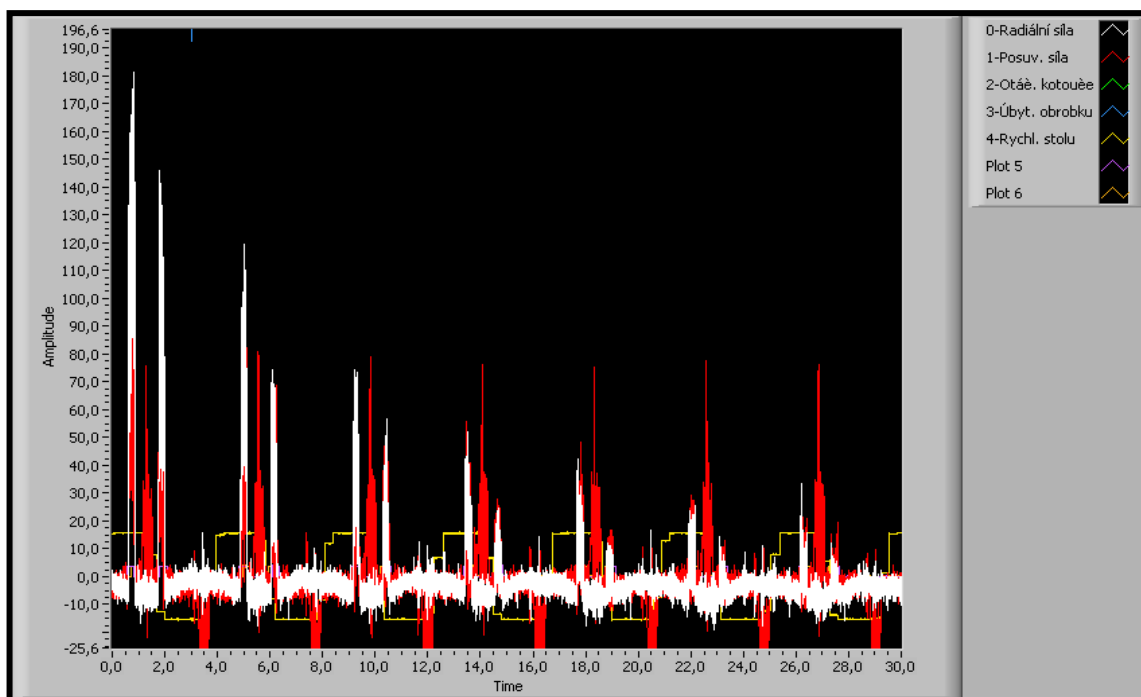
4 Návrh metodiky experimentů pro zkoumání vlivu procesních kapalin na řezivost brousicího kotouče a kvalitu obrobených součástí při broušení konstrukční a nerezové oceli

4.1 Měření řezivosti

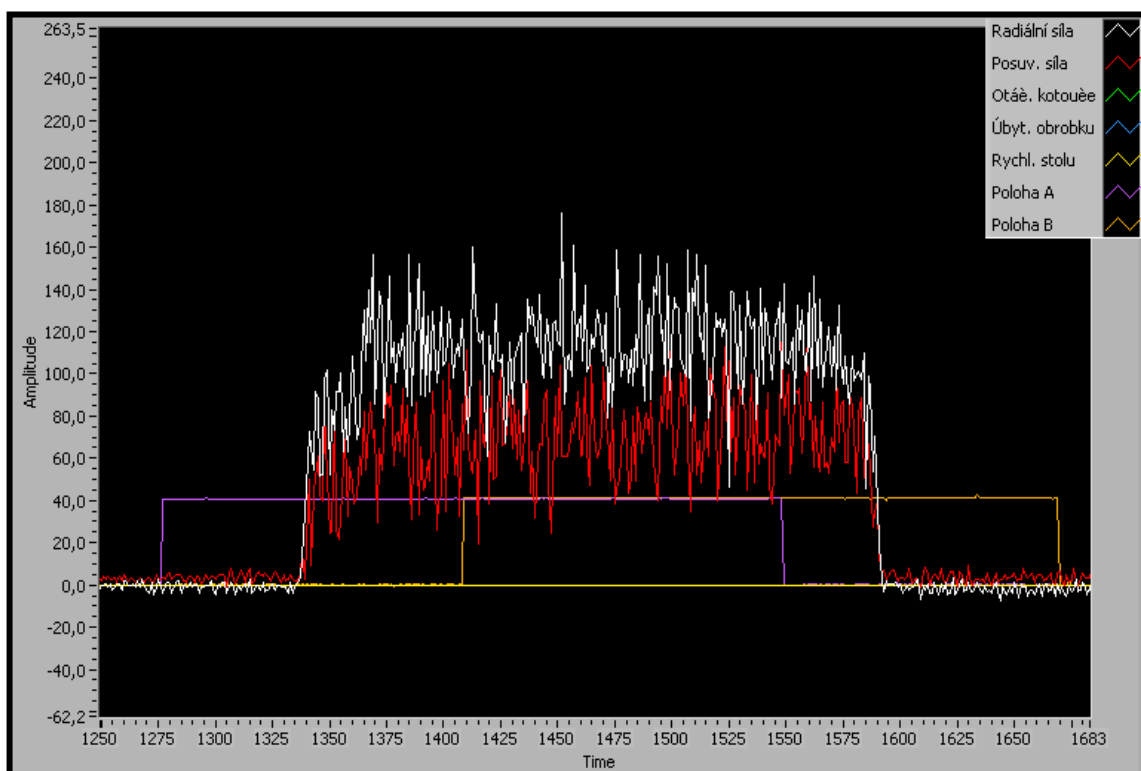
4.1.1 Postup měření řezivosti

Pro vyhodnocení měření je nejdůležitější síla radiální neboli kolmá řezná síla F_{CN} . Z hodnot této síly byl programem LabView zpracován graf velikosti střední radiální řezné síly pro jednotlivé zdvihy pracovního stolu brusky a zároveň byla vyhotovena tabulka smluvní radiální řezné síly pro všech pět měření. Graf i tabulka jsou získány zpracováním signálů z dynamometru KISTLER a dále matematickým zpracováním těchto dat programem LabView 6.1. Doba měření byla nastavena dvěma indukčními snímači, které vymezily požadovaný interval záznamu signálu složky radiální řezné síly F_{CN} z dynamometru KISTLER během každého záběru brousicího kotouče při jednotlivých zdvích pracovního stolu brusky.

K záznamu a odečítání hodnot jednotlivých složek sil vzniklých při broušení, změřených dynamometrem KISTLER, stejně jako hodnot úbytku materiálu, otáček kotouče a hodnot ze snímače rychlosti posuvu byla použita počítačová sestava s měřicí kartou a nainstalovaným speciálním programem LabView 6.1. V tomto programu jsou jednotlivé řezné síly zobrazeny v souhrnném grafu (Graf č. 1) s možností libovolného přiblížení (Graf č. 2).



Graf č. 1 Souhrnný graf měřených sil

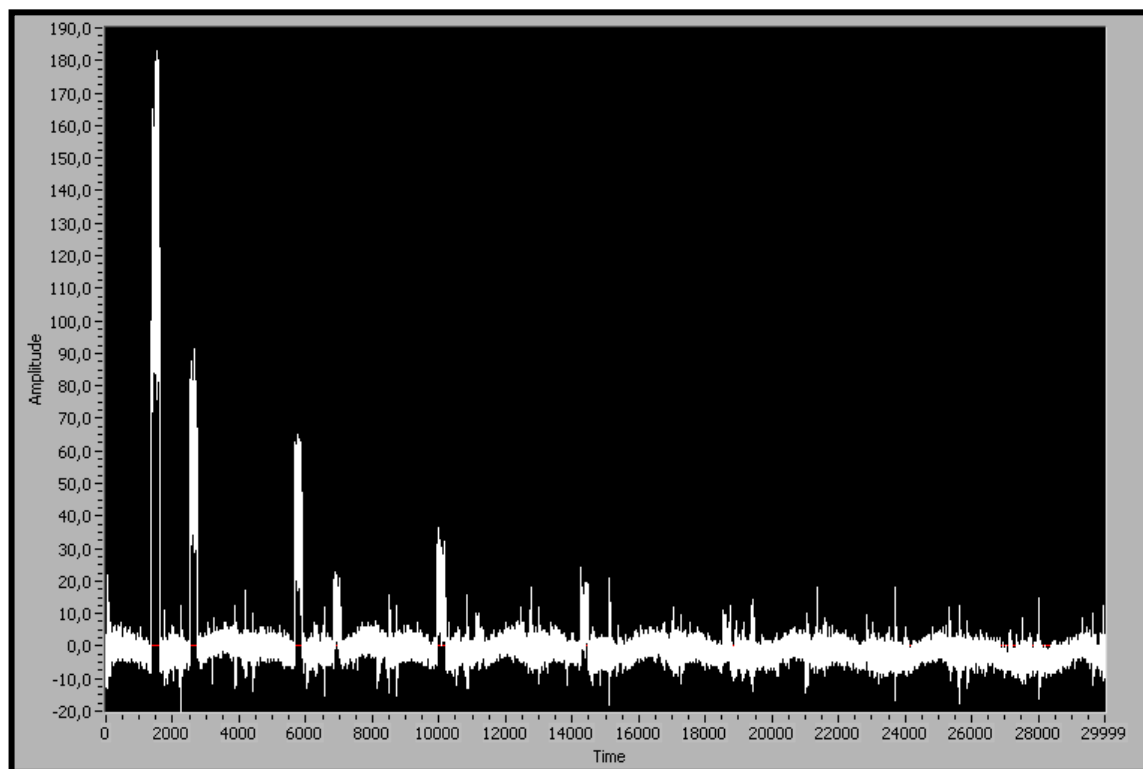


Graf č. 2 Detail souhrnného grafu měřených sil

4.1.1 Postup vyhodnocení měření drsnosti povrchu

Výsledné hodnoty radiální řezné síly F_{CN} (Graf č. 3) v průběhu záběru brousicího kotouče při konkrétním zdvihu pracovního stolu brusky se určí s pomocí programu LabView 6.1 a to z maximálních hodnot zaznamenaných signálů (tzv. píků – z angl.

„peak“ = vrchol, špička). Pro výpočet byly použity všechny zaznamenané signály, které byly v rozsahu od předchozího naměřeného signálu sniženo nebo zvýšeno o 20%. Z rozsahu těchto hodnot byla pro každý zdvih pracovního stolu brusky vypočtena střední hodnota radiální řezné síly F_{CN} .

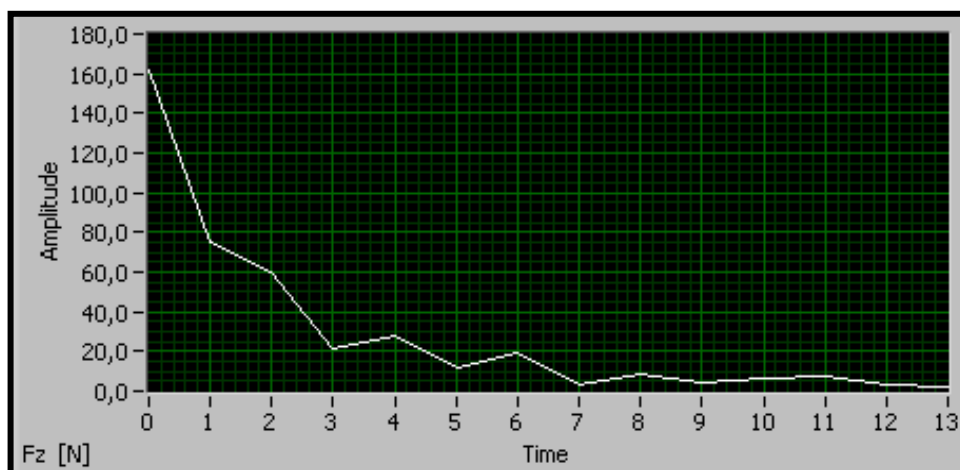


Graf č. 3 Záznam všech hodnot měřené řezné síly F_{CN} z dynamometru KISTLER při broušení za sucha

		Radiální síla [N]	Posuv. síla [N]
Číslo zdvihu	1	161,95	103,87
	2	74,94	58,23
	3	59,83	48,33
	4	21,77	30,32
	5	27,71	34,63
	6	11,57	24,64
	7	19,74	28,76
	8	3,70	23,02
	9	8,95	25,04
	10	3,81	22,75
	11	6,48	22,34
	12	6,97	22,61
	13	3,00	22,99
	14	1,99	22,71

Tabulka 1 Vyhodnocení sil při jednotlivých zdvizech stroje

Ze středních hodnot radiální řezné síly byl programem LabView 6.1 sestrojen graf (Graf č. 4), ze kterého je tato střední hodnota patrná pro jednotlivé zdvihy pracovního stolu stroje, stejně jako klesající průběh radiální řezné síly F_{CN} . Z hodnot střední radiální řezné síly při prvních šesti zdvizích pracovního stolu brusky byla aritmetickým průměrem stanovena hodnota smluvní radiální řezné síly. Hodnoty jednotlivých smluvních radiálních řezných sil shrnuje Tabulka .



Graf č. 4 Průběh velikosti střední radiální řezné síly F_{CN} při jednotlivých zdvizích stolu při broušení za sucha

Číslo měření	Smluvní radiální řezná síla [N]
1	59,21
2	59,02
3	69,78
4	70,27
5	59,63

Tabulka 2 Smluvní radiální řezná síla, řezným prostředím je vzduch

Konečným výsledkem všech pěti měření při jednom řezném prostředí byl jediný údaj vypočtený aritmetickým průměrem z hodnot smluvní radiální řezné síly získaných z jednotlivých měření – střední smluvní radiální řezná síla. Velikost střední smluvní radiální řezné síly zobrazuje Tabulka 3.

Hodnotu střední smluvní radiální řezné síly dosažené při broušení na sucho poté použijeme jako výchozí „etalon“. Zvolena ovšem mohla být hodnota kterékoliv F_{SCN} , která

byla získána z mnoha naměřených hodnot. Vzduch jako etalon byl zvolen z čistého předpokladu, že se bude jednat o nejhorší z vybraných procesních prostředí.

Řezné prostředí použité při měření	Střední smluvní radiální řezná síla F_{SCN} [N]
vzduch	63,58

Tabulka 3 Střední smluvní radiální řezná síla

Veškeré ostatní naměřené a přepočtené hodnoty střední smluvní radiální řezné síly poté přepočteme na hodnotu indexu řezivosti i_R dle vzorce:

$$i_R = \frac{F_{SCNi}}{F_{SCNV}}, \text{ kde}$$

i_R index řezivosti

F_{SCNi} hodnota střední smluvní radiální řezné síly získané při obrábění s použitím libovolné procesní kapaliny

F_{SCNV} hodnota střední smluvní radiální řezné síly získána při obrábění s etalonovým prostředím – vzduchem (63,58N)

4.2 Měření kvality povrchu

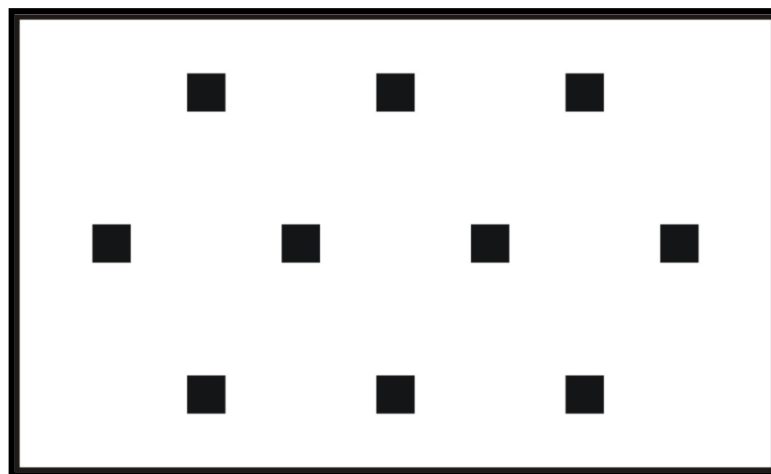
4.2.1 Postup měření drsnosti povrchu

Drsnost povrchu je ve většině případů nutné měřit kolmo na směr nerovností. Není-li dodržena tato zásada, dochází ke zkreslení pohledu na povrch, který se při nesprávně zvoleném směru může zdát lepším, než je ve skutečnosti. U součástí vyrobených třískovým způsobem, kde nástroj zanechává na povrchu obrobku stopy, které mohou být jasně zřetelné, platí tato zásada vždy. V případě měření povrchu součástí vyrobených např. kování nebo odléváním, kdy nástroj působí na povrch odlišným způsobem, nemá směr snímání na měření drsnosti vliv, ale je nutné tento směr v průběhu měření měnit.

4.2.2 Postup vyhodnocení měření drsnosti povrchu

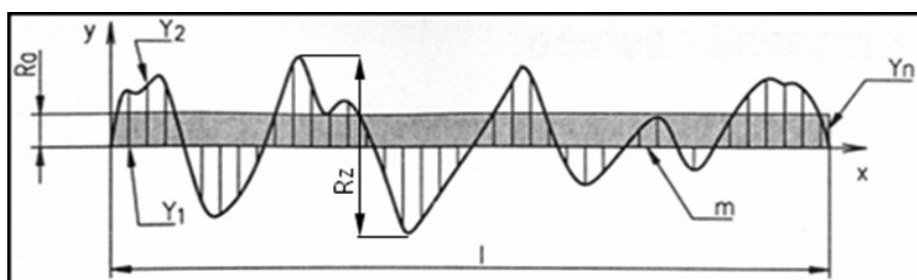
Pro měření drsnosti bylo zhotoveno celkem 14 zkušebních vzorků, z nichž polovina byla zhotovena z oceli 14 220.3 a polovina z materiálu 17 351. Všechny tyto vzorky byly obráběny broušením s orovnaným kotoučem za stejných řezných podmínek, jaké byly

popsány v kapitole 5.4.2 s použitím procesních kapalin popsaných v kapitole 5.3. Místa měření byla definována dle tvaru zkušební vzorku tak, aby byla komplexně proměřena celá plocha vzorku a byla zvolena dle Obr. 15.

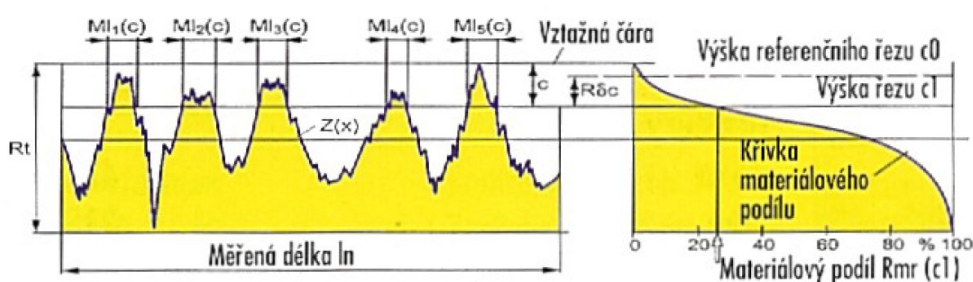


Obr. 15 Místa měření drsnosti povrchu zkušební vzorku

Pro vyhodnocení naměřených hodnot drsností povrchu zkušebních vzorků byly zvoleny parametry, definované normou ISO a jeden nenormovaný parametr. Normovanými údaji byly R_a – průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu a R_z – největší výška profilu (Obr. 16). Nenormovaným údajem byl pak ukazatel c_{TP50} , který udává v jaké hloubce od povrchu je podíl materiálu a vzduchu roven poměru 1:1. Tento údaj je odečten z křivky materiálového podílu – tzv. Abbottovi křivky (Obr. 17).



Obr. 16 Profilová křivka drsnosti povrchu [8]



Obr. 17 Abbottova křivka nosného podílu [8]

Aby byly výsledky relevantní, byly statisticky zpracovány dle postupu, který je uveden v normě ČSN ISO 8688-1 – Testovanie trvanlivosti při frézovanie [1].

S ohledem na reprodukovatelnost a na co nejlepší pokrytí povrchu vzorku bylo náměrovými místy měření opakováno desetkrát.

Prvním krokem bylo určení aritmetické hodnoty jednotlivých opakování. Symbol x simuluje naměřenou hodnotu parametru drsnosti povrchu. Střední hodnota \bar{x} byla spočtena podílem součtu výsledků z každého souborů měření počtem opakování n :

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Normalizovaná odchylka s , byla následně spočtena jako odmocnina součtu čtverců všech rozdílů mezi individuálními hodnotami každého opakování x_i a střední hodnoty \bar{x} , dělené počtem opakování $n - 1$.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Statistický interval spolehlivosti definovaný jako interval, v rámci kterého jsou výsledky dalšího zkušebního testu umístěné s předpokládanou pravděpodobností, se vypočetl jako střední hodnota $\bar{x} \pm$ její variace:

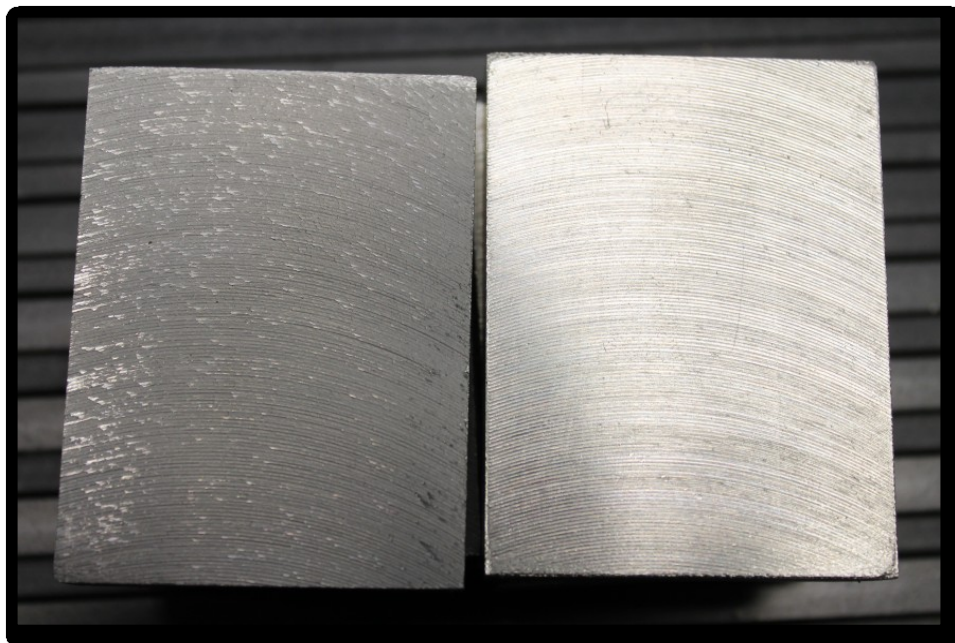
$$\bar{x}_{\max} = \bar{x} + t \frac{s}{\sqrt{n-1}} \quad \text{a} \quad \bar{x}_{\min} = \bar{x} - t \frac{s}{\sqrt{n-1}},$$

kde t je konstanta 2,2622 pro úroveň spolehlivosti 95% a stupeň volnosti 10. Vypočtené odchylky včetně statického intervalu spolehlivosti byly zaznamenány do tabulky a do grafu byly vyneseny průměrné hodnoty.

5 Realizace experimentů

5.1 Broušené materiály použité při měření

Broušené vzorky materiálu jsou obrobena frézováním na rozměr 15x50x60 mm (viz Obr. 18: vlevo materiál 14 220.3, vpravo 17 351).



Obr. 18 Vzorky materiálů

5.1.1 Nízkolegovaná ocel třídy 14

5.1.1.1 Složení a použití materiálu

Jedná se o ocel konstrukční ušlechtilou nízkolegovanou s obsahem 0,14 až 0,19% uhlíku (C) a obsahem legujících prvků 1,1 až 1,4% manganu (Mn), 0,17 až 0,37% křemíku (Si), 0,8 až 1,1% chromu (Cr) a dále pak maximálně 0,035% fosforu (P) a 0,035% síry (S).

Tyto oceli se používají na výrobu menších hřídel, ozubených kol, šneků, vačkových hřídel, vřeten obráběcích strojů, pístních čepů, per, zubových spojek, trnů či upínacích nářadí apod. [10].

5.1.1.2 Vlastnosti materiálu

Ocel 14 220 je dobře tvárná za tepla a po žíhání i zastudena, je dobře obrobitelná a dobře svařitelná. Tento materiál je vhodný na strojní součásti s velmi tvrdou cementovanou vrstvou a po kalení i velkou pevností v jádře.

Ocel 14 220.3 Mn – Cr s obsahem uhlíku 0,14 až 0,19%, je žíhána na měkko a disponuje mechanickými vlastnostmi:

- pevnost v tahu $R_{m \min.}$ 785 MPa
- pevnost na mezi kluzu $R_{e \min.}$ 590 MPa
- tvrdost podle Brinella HB min. 239

5.1.2 Nerezová ocel třídy 17

5.1.2.1 Složení materiálu

Ocel konstrukční ušlechtilá s obsahem uhlíku (C) 0,08% a vysokým obsahem legujících prvků – 15,5 až 17% chromu (Cr), 5,5 až 7% niklu (Ni), 0,5 až 1,0% titanu (Ti), 0,3 až 0,8% manganu (Mn), maximálně 0,9% křemíku (Si), 1% hliníku (Al), dále s maximálním obsahem 0,045% fosforu (P) a 0,035% síry (S).

Oceli třídy 17 se používají na nerezavějící součásti odolávající otěru, odolávající zředěné kyselině dusičné a některým slabým organickým kyselinám – např. nože, měřidla a chirurgické nástroje [10].

5.1.2.2 Vlastnosti materiálu

Ocel 17 351 s obsahem uhlíku 0,08% je odolná proti korozi, je obrobitelná, dobře tvárná za tepla a vyznačuje se těmito vlastnostmi:

- pevnost v tahu $R_{m \min.}$ 750-900 MPa
- pevnost na mezi kluzu $R_{e \min.}$ 490 MPa
- tvrdost podle Brinella HB max. 229

5.2 Parametry broušení

5.2.1 Brousicí nástroj



Obr. 19 Brousicí kotouč

K prováděným zkouškám byl použit brousicí nástroj od firmy CARBORUNDUM ELECTRITE (Obr. 19) s označením 98A 46 K 9 V 01 o průměru 250 mm a šířce 26 mm. Jde o nástroj z růžového umělého korundu s keramickým pojivem, se zrnitostí 98 (ok na palec), tvrdostí K a je tedy měkký, strukturou 9, což označuje jemnou pórovitost.

5.2.2 Obráběcí stroj

Veškeré zkoušky probíhaly na stroji BPH 320 A od výrobce B·S·H Machines, brusce určené k broušení rovinných ploch obvodem kotouče (Obr. 20).



Obr. 20 Rovinná bruska BPH 320 A

Parametry tohoto stroje jsou:

upínací plocha stolu: 320x1000 mm;
 počet upínacích drážek stolu: 3;
 šířka x rozteč drážek: 12x100 mm;
 největší zatížení stolu: 2800 N;
 největší šířka broušení: 320 mm;
 největší délka broušení: 1000 mm;
 největší výška obrobku při novém kotouči: 350 mm;
 největší vzdálenost osy vřeteny od upínací plochy stolu: 475 mm;
 brusný kotouč (průměr x šířka x průměr díry): 250x32x76 mm;
 otáčky brusného kotouče: až 2600/min;
 průměr brusného kotouče po opotřebení: 120 mm;
 podélný pohyb stolu: 1060 mm;
 příčný pohyb stolu: 350 mm;
 svislý pohyb broušícího vřeteníku: 420 mm;
 rychlost podélného pohybu stolu: 2-22 m/min;
 příčný posuv stolu v úvratích: 0,1 - 4,0 mm;
 svislý přísuv do řezu - 1 dílek na stupnici 0,005 mm;

svislý posuv motorický: 0,42 m/min;
elektromotor brousícího vřeteníku: 4 kW;
elektromotor čerpadla hydrauliky: 2,2 kW;
elektromotor posuvu vřeteníku: 0,37 kW;
celkový příkon stroje: 6,8 kVA;
půdorysná plocha stroje (délka x šířka): 4100x1750 mm;
výška stroje: 2125 mm;
hmotnost stroje: 3200 kg.

5.3 Procesní kapaliny použité při měření

V průběhu pokusu bylo použito celkem 11 různých procesních kapalin, z toho 5 prototypových kapalin dodaných výrobcem PARAMO, a.s. se souhrnným označením ESOK. Dále bylo použito 6 kapalin renomovaných výrobců. Materiálové listy těchto kapaliny jsou uvedeny v příloze. Z důvodu dalšího porovnání byly, jako další procesní kapaliny použity voda a vzduch.

Všechny formulace dodaných koncentrátů prototypových kapalin od firmy PARAMO, a.s. jsou syntetické a jsou založeny na korozním inhibitoru založeném na produktech neutralizace polykarboxylových kyselin a terciálních alkanolaminů. Biocidní a protipěnovostní systém je u všech těchto formulací stejný. Kapaliny se od sebe odlišují systémem přísad ovlivňujících mazivost. Tento systém je ovlivněn především tím, jak má být kapalina šetrná vůči zdraví pracovníků a vůči životnímu prostředí. S ohledem na chemický zákon 350/2011Sb. se jedná o kapaliny, které nejsou klasifikovány jako nebezpečné. Vliv kapalin na zdraví osob a životní prostředí by měl být tedy u koncentrátů minimální a u naředěné procesní kapaliny téměř zanedbatelný [13].

Níže je uveden přehled použitých kapalin, refrakční index (κ) příslušné kapaliny, případně viskozita obsaženého polyalkylenglykolu nebo použité přísady a šetrnost kapaliny vůči zdraví pracovníků a životnímu prostředí.

- a) procesní kapalina **ESOK 1.0E**; $\kappa = 3,1$; polyalkylenglykol nižší viskozity, kapalina velmi šetrná.
- b) procesní kapalina **ESOK 1.0F**; $\kappa = 3,1$; polyalkylenglykol velmi vysoké viskozity, kapalina velmi šetrná.

- c) procesní kapalina **ESOK 1.1B**; $\kappa = 2,1$; směs polyalkylenglykolů střední a nižší viskozity, vysokotlaká přísada založená na esterech kyseliny fosforečné, kapalina šetrná.
- d) procesní kapalina **ESOK 1.1D**; $\kappa = 1,85$; směs polyalkylenglykolů střední a nižší viskozity, vysokotlaká přísada založená na solích thiokyselin, kapalina šetrná.
- e) procesní kapalina **ESOK 1.0D**; $\kappa = 3,0$; polyalkylenglykol střední viskozity, kapalina velmi šetrná.
- f) procesní kapalina **Hocut 795B**; $\kappa = 1,0$;
- g) procesní kapalina **EOPS 1030**; $\kappa = 1,1$;
- h) procesní kapalina **Blasocut BC 35 Kombi**; $\kappa = 1,0$;
- i) procesní kapalina **Vasco 1000**; $\kappa = 1,0$;
- j) procesní kapalina **Grindex 10**; $\kappa = 1,6$;
- k) procesní kapalina **Cimstar 620**; $\kappa = 1,4$;

- Pro porovnání bylo použito ještě všeobecně dostupných řezných prostředí

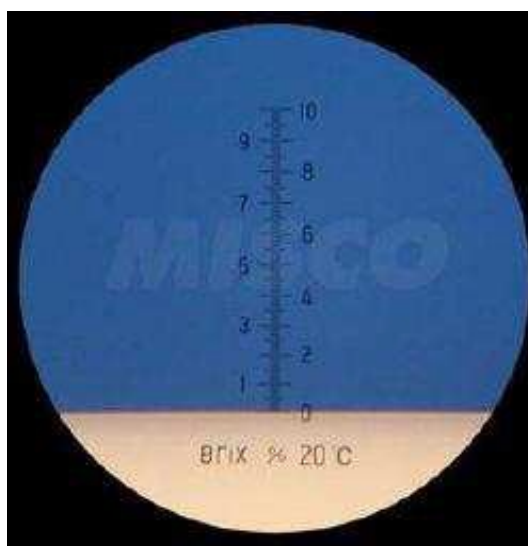
- l) vzduch
- m) voda

Všechny výše zmíněné procesní kapaliny byly zředěny vodou tak, aby vytvořily roztok o koncentraci 5%. K určení výsledné požadované koncentrace bylo využito ručního refraktometru (Obr. 21).

Refraktometr funguje na principu lomu světla. Na sklíčko tohoto zařízení se nanese nepatrné množství emulze. Velikost koncentrace emulze ovlivní lom světla. Čím vyšší koncentrace, tím je vyšší úhel lomu. Následně už se ze stupnice refraktometru může odečíst hodnota (Obr. 22). Celková hodnota koncentrace je stanovena jako součin refrakčního indexu dané emulze (κ) a hodnoty odečtené na stupnici refraktometru. V případě příliš vysoké hodnoty koncentrace (>5%) se procesní kapalina zředí přidáním další vody a v případě příliš nízké koncentrace (<5%), se do již namísené procesní kapaliny opětovně přidá samotná emulze.



Obr. 21 Ruční refraktometr Optech Brix



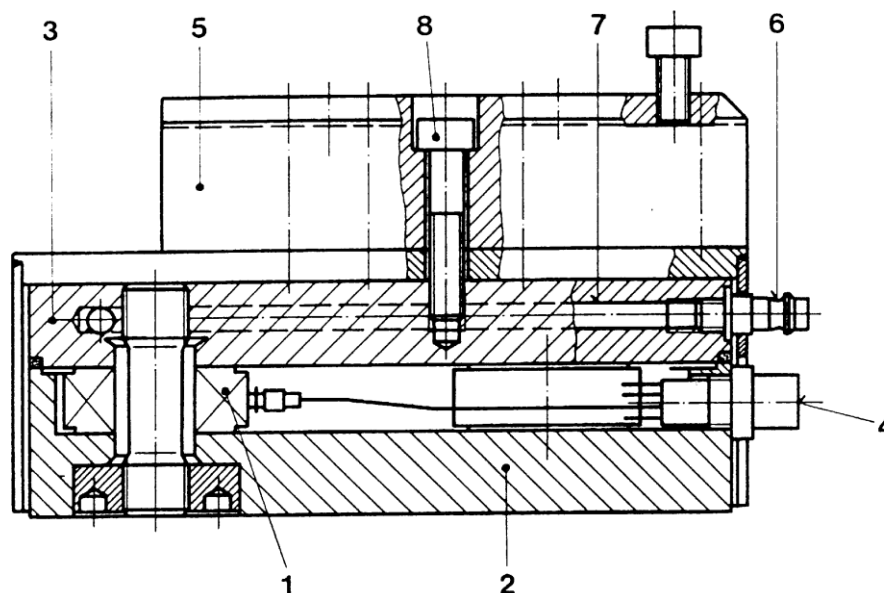
Obr. 22 Měrná stupnice refraktometru

5.4 Měření řezivosti

5.4.1 Přístroje a nástroje pro měření řezivosti

- **Dynamometr KISTLER model 9265 B** – jde o třísložkový piezoelektrický dynamometr s možností měření tří navzájem kolmých složek jedné síly. Běžně se může používat pro měření řezných sil při většině obráběcích operací. Model 9265 B obsahuje 4 piezoelektrické snímače, které jsou konstrukčně uspořádány tak, aby každý snímač zachycoval sílu v jiném směru. Síly zachycené ze snímačů se sčítají. Z tohoto důvodu nemá vliv, v jakém místě, upínací části dynamometru, se nachází nositelka měřené síly. Na dynamometru KISTLER byly provedeny úpravy kvůli uchycení strojního svěráku a zejména kvůli ochraně před poškozením (viz Obr. 23). Pro správnou funkci dynamometru je

potřeba zajistit dodržení klimatických podmínek v rozsahu hodnot: teplota okolí $21^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$; vlhkost vzduchu $42\% \pm 5\%$.



Obr. 23 Schéma dynamometru KISTLER [12]

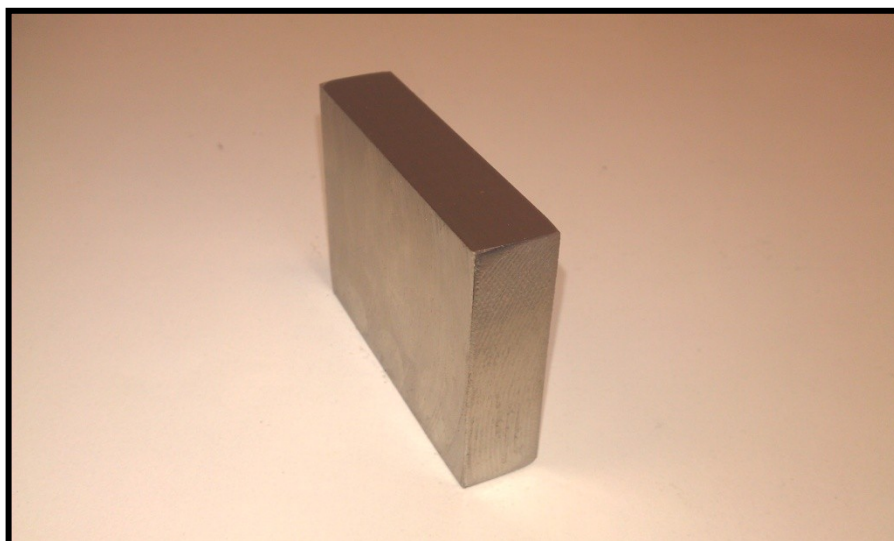
- 1 – piezoelektrický snímač; 2 – základová deska; 3 – vrchní deska;
4 – konektor; 5 – upínací část dynamometru; 6 – vstup pro chladivo;
7 – chladič kanál; 8 – šroub pro připevnění upínací části;

- **Nábojový zesilovač model 5019 B** – zesiluje náboje z piezoelektrických snímačů a dále je přenáší do PC s měřicí kartou a nainstalovaným programem LabView 6.1.
- **Refraktometr** – (viz kapitola 5.3) model RLC/ATC s přesností 0,1% a rozsahem měřitelné koncentrace 0 – 18%. Tento model je vybaven zařízením pro automatickou kompenzaci teploty.
- **Spárové měrky** – nástroj sloužící k měření či nastavení tloušťky mezery. Skládá se z několika plíšků různých šířek.

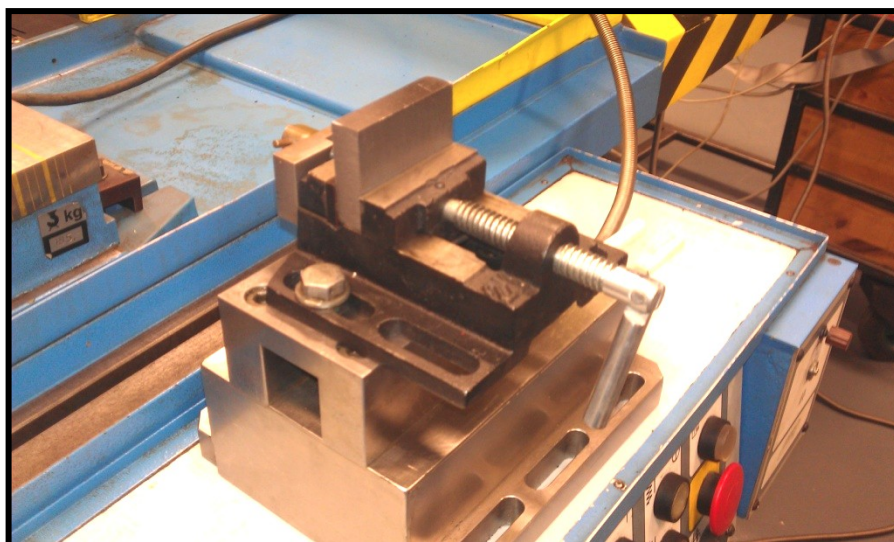
5.4.2 Průběh měření rezivosti

Aby byla zajištěna možnost srovnání jednotlivých měření, je pro oba zkoušené materiály použit stejný brousicí kotouč, stejná hloubka řezu, otáčky i podélný posuv a jedinou měnící se veličinou bude použité řezné prostředí.

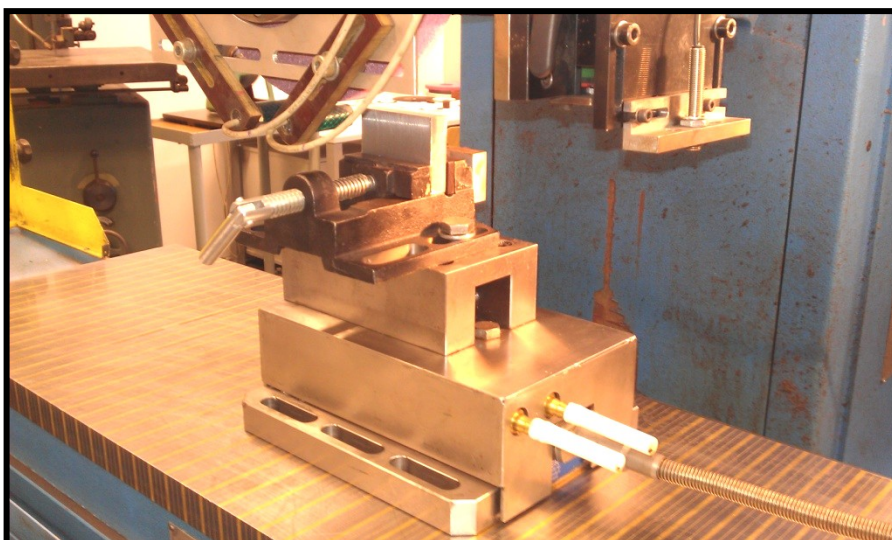
Připravený vzorek materiálu z oceli 14 220.3 ve tvaru hranolu o rozměrech 15x50x60 mm (Obr. 24) byl upnut do univerzálního upínacího přípravku (svěráku), upevněného na dynamometru KISTLER (Obr. 25). Takto sestavené zařízení bylo upnuto na magnetickou plochu brusky BPH 320 A (Obr. 26). Následně byla vzorkovému materiálu zarovnána rovinná plocha a po té bylo provedeno orovnění kotouče (Obr. 28). Orovnávání bylo prováděno jednokamenovým diamantovým orovnávačem.



Obr. 24 Vzorek materiálu 14 220.3

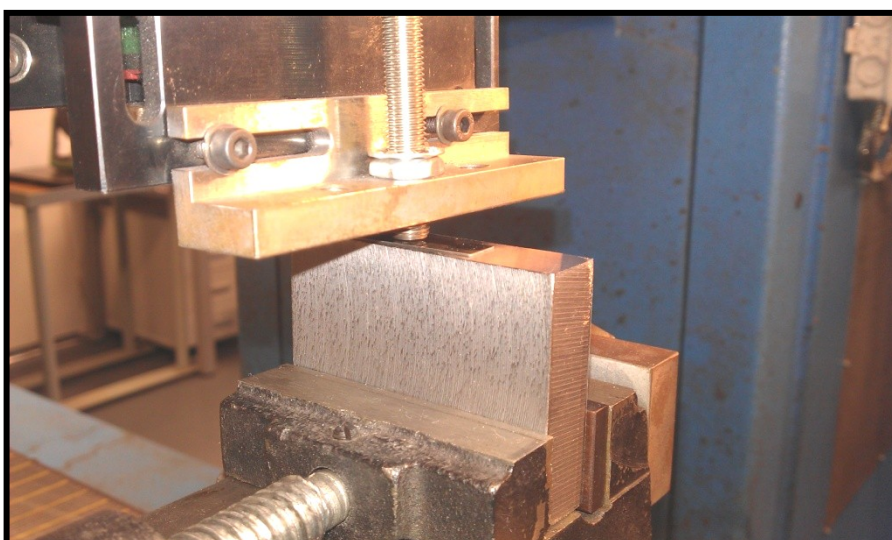


Obr. 25 Upnutí vzorku ve strojním svěráku

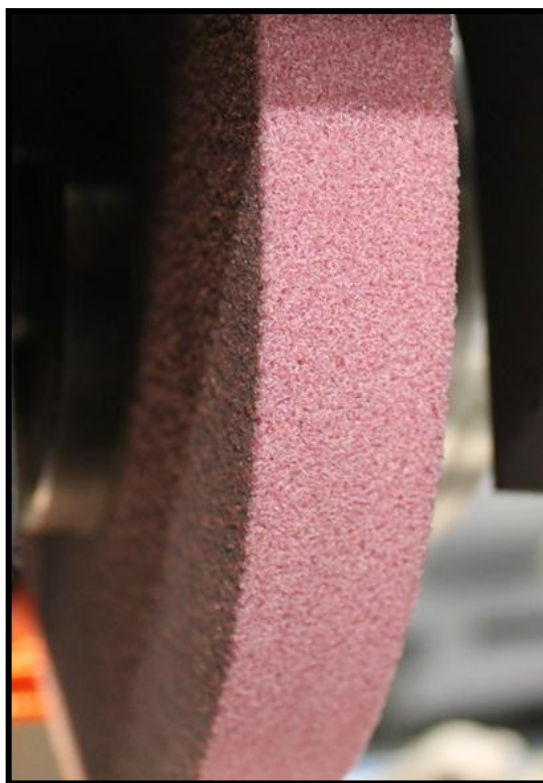


Obr. 26 Dynamometr KISTLER upnutý na magnetické desce pracovního stolu

Po orovnění kotouče a zarovnání obráběné plochy byl ustaven vertikální senzor, který snímá skutečnou velikost úběru materiálu, za použití spárových měrek do výše 0,7 mm nad plochu obrobku (Obr. 27). Aby se omezil vliv tepelné změny materiálu přenesené na dynamometr KISTLER, je toto zařízení napojeno na externí chlazení s vodním čerpadlem Eheim 1048-790 s keramickými ložisky o průtočnosti cca 600 l/hod.



Obr. 27 Ustavení mezery mezi vertikálním senzorem a broušeným materiálem

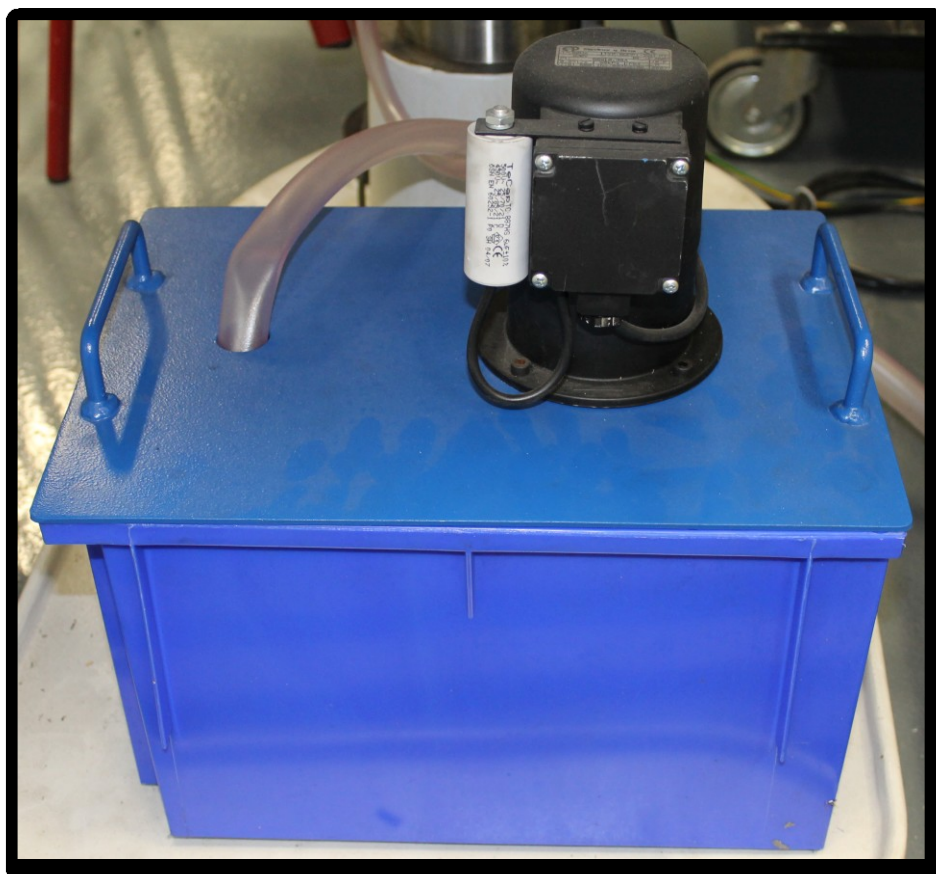


Obr. 28 Orovnaný kotouč

Po nastavení pracovních parametrů broušení, tzn.: otáčky $n = 2500 \text{ min}^{-1}$; hloubka řezu $h = 0,01 \text{ mm}$; podélný posuv $15,5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, byl proveden první úběr materiálu při broušení na sucho (řezným prostředím je vzduch) o výše zmíněné hloubce řezu a následovalo dalších 13 přejetí materiálu broušicím kotoučem, při stále stejné hloubce řezu – tzv. vyjiskření. Celkem tedy bylo provedeno 14 přejetí materiálu, z toho 7 bylo sousledným broušením a 7 broušením nesousledným.

Z důvodu ověření jednotlivých výsledků a zamezení chyb je každé měření provedeno pětkrát při použití stejného materiálu i řezného prostředí a při zachování stejných řezných podmínek.

Při měření s použitím hmotného řezného prostředí (jiného než vzduch) bylo k přepravě procesní kapaliny použito externího čerpadla (Obr. 29) napájené 230V, s příkonem 65W a průtokností $0,27 \text{ l/sec}$. Přívodu procesní kapaliny do místa řezu bylo dosaženo flexibilním krkem s tryskou a magnetickým upínáním (Obr. 30). Proud procesní kapaliny byl nasměrován na kotouč, nepatrně nad oblast řezu tak, aby vlivem unášivosti kotouče došlo k usměrnění kapaliny do místa řezu. Pokud by se kapalina nasměrovala přímo na oblast řezu, mohlo by dojít k ovlivnění přesnosti měření právě díky působení dopadající kapaliny.



Obr. 29 Čerpadlo pro dopravu procesní kapaliny



Obr. 30 Flexibilní krk s tryskou a magnetickým upínáním

5.5 Měření drsnosti povrchu

Účelem měření je stanovit drsnost povrchu dle ČSN EN ISO 4287:1997 pro jednotlivé vzorky, které byly obrobena broušením za použití různých řezných prostředí (viz kapitola 5.3). Z výsledků měření je následně stanovena vhodnost použití jednotlivých kapalin. Každý z měřených vzorků byl po ihned po obrobění zbaven zbytků procesní kapaliny, aby nedošlo k případnému narušení povrchu dlouhodobějším působením procesní kapaliny (zejména se tento problém týkal oceli tř. 14). Následně po té byly vzorky

jednotlivě a pečlivě označeny a zabaleny (Obr. 31 a Obr. 32), aby nedošlo k záměně nebo poškození povrchu vzorku a tím jeho znehodnocení.



Obr. 31 Zabalené vzorky pro měření drsnosti



Obr. 32 Připravený vzorek pro měření drsnosti

5.5.1 Přístroje použité pro měření drsnosti povrchu

- **Profiloměr Mitutoyo Surftest SV-200N2** (Obr. 33) je přístroj pracující na principu dotykové metody snímání povrchu, tzn. jedné z nejrozšířenějších a zároveň normovaných metod měření povrchu. Profiloměr se skládá ze dvou částí. Část mechanická snímá pomocí hrotu nerovnosti povrchu. Část elektronická zpracovává vertikální pohyb hrotu v převodníku a transformuje jej na signál, který je zpracován buď do číselných hodnot parametrů struktury povrchu, nebo na grafický záznam profilu. Zpracování naměřených dat je prováděno pomocí dodaného softwaru „Surfpak“, který je nainstalován v připojeném počítači. Tento software umožňuje vyhodnocení parametrů drsnosti dle norem ISO, DIN a JIS, zobrazení profilů v různém nastavení a vyjádření profilu pomocí zvoleného diagramu.
- Technické parametry profiloměru Mitutoyo Surftest SV-2000N2 jsou následující:

Posuv (rozsah osy X)	50 mm
Zdvih (rozsah osy Z)	800 μ m
Výškové přestavění	300 mm
Rozměry základní desky (š x h)	610 x 450 mm
Počet vypočtených parametrů	55

- **Dotek č. 12AAB403** (Obr. 34) se používá jako koncový prostředek pro měření drsnosti povrchu pomocí profiloměru. Obsahuje diamantovou kuželovou špičku s rádiusem $5\text{ }\mu\text{m}$ s vrcholovým úhlem 90° . Tato špička umožňuje dobrý posun po měřeném povrchu a zároveň má díky diamantu takové vlastnosti, aby bylo její použití vhodné pro jakýkoliv povrch.



Obr. 33 Profiloměr Mitutoyo Surftest SV-2000N2



Obr. 34 Dotkový snímač pro měření drsnosti povrchu

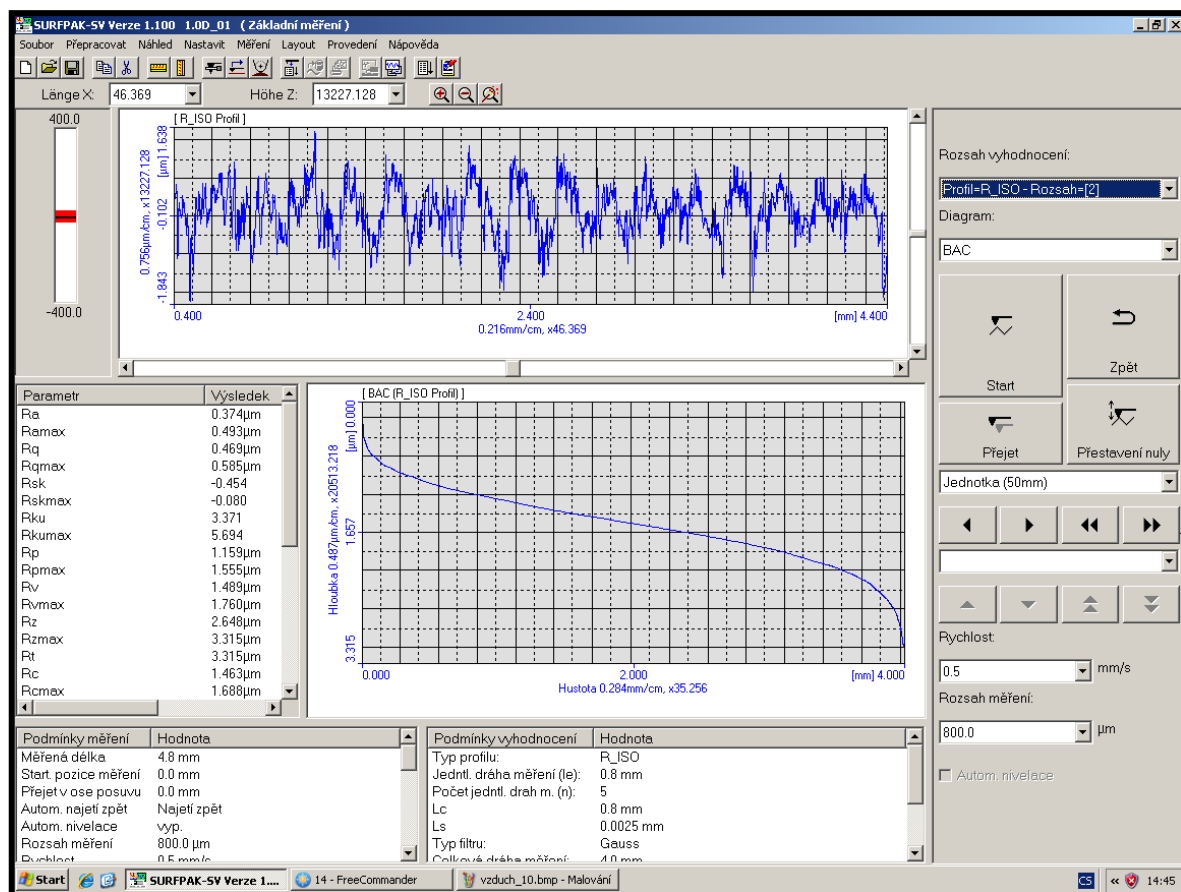
5.5.2 Průběh měření drsnosti povrchu

Na každém vzorku bylo provedeno deset měření (viz kapitola 4.2.2), přičemž délka měřeného úseku při každém měření činila 5 mm. Lze tedy konstatovat, že pro měření drsnosti povrchu na daném vzorku bylo provedeno na 50 mm délky.



Obr. 35 Měření drsnosti na profiloměru Mitutoyo SurfTest SV-2000N2 v laboratoři KOM

Pro každé měřené místo byla, z naměřené délky, programem Surfpak vypracována profilová křivka a současně Abbottova křivka nosného podílu (Obr. 36). Z profilové křivky byly v programu Surfpak vyhodnoceny hodnoty drsnosti R_a a R_z . Z Abbottovi křivky nosného podílu byla odečtena hodnota, v níž dosahují vzduchové mezery a materiál poměru 1:1, tzn. c_{TP50} .



Obr. 36 Profilová a Abbottova křivka z programu Surfpak

Pro každé měřené místo byly veškeré hodnoty R_a , R_z a c_{TP50} zaneseny do tabulky a po naměření všech deseti míst byly z celkové tabulky statistickou metodou popsanou v kapitole 4.2.2 vypočteny hodnoty R_a , R_z a c_{TP50} (viz Tabulka 8), které odpovídají danému materiálu obrobeného broušením s využitím příslušné procesní kapaliny. Po vypočtení průměrných hodnot byla do tabulky zanesena i statistická odchylka.

6 Porovnání řezivosti broušícího kotouče a drsnosti obrobeného povrchu při použití různých procesních kapalin

6.1 Porovnání řezných sil

Vliv procesní kapaliny při procesu broušení se projevil jako změna velikosti radiální řezné síly F_{CN} a tím i změnou průběh střední radiální řezné síly při jednotlivých zdvizích pracovního stolu stroje.

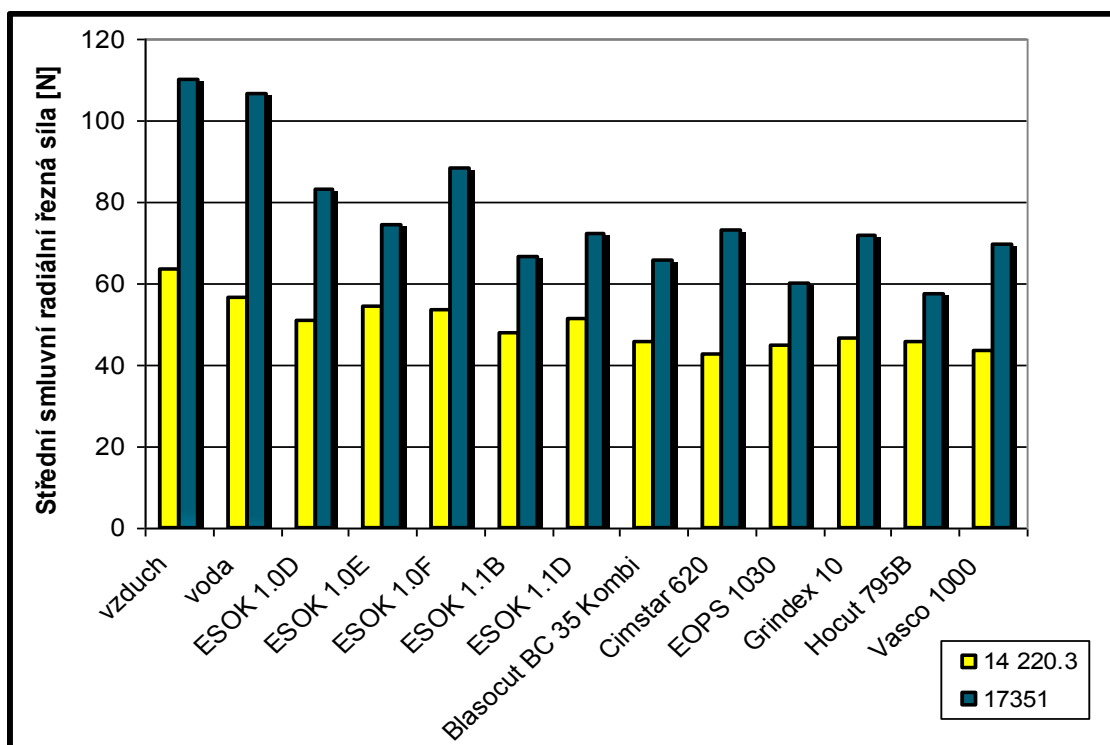
Pro každé řezné prostředí bylo provedeno 5 měření a veškeré výsledky smluvní radiální řezné síly při obrábění materiálu 14 220.2 shrnuje Tabulka 4 a při obrábění materiálu 17 351 Tabulka 5, stejně tak tyto tabulky zobrazují Střední smluvní radiální řeznou sílu (tzn. průměr z jednotlivých měření). Závislost střední smluvní radiální řezné síly na řezném prostředí zobrazuje Graf č. 5.

Procesní prostředí	Smluvní radiální řezná síla [N]					Střední smluvní radiální řezná síla F _{SCN} [N]
	Měření číslo					
	1	2	3	4	5	
Vzduch	59,21	59,02	69,78	70,27	59,63	63,6
Voda	58,95	55,43	56,44	55,63	56,48	56,6
ESOK 1.0E	47,7	52,46	58,75	56,16	56,56	54,3
ESOK 1.0F	56,61	53,73	52,37	49,42	54,58	53,3
ESOK 1.1D	52,22	47,16	54,96	54,46	48,22	51,4
ESOK 1.0D	52,97	54,31	49,97	48,84	48,48	50,9
ESOK 1.1B	45,42	50,18	46,88	48,2	49,46	48,0
Grindex 10	42,61	48,49	46,39	47,9	46,77	46,4
Hocut 795B	45,94	45,24	44,18	46,84	46,74	45,8
Blasocut BC 35 Kombi	47,33	43,72	46,22	42,79	48,33	45,7
EOPS 1030	43,38	47,5	46,95	44,82	41,86	44,9
Vasco 1000	43,53	43,64	42,79	44,38	42,84	43,4
Cimstar 620	42,93	42,28	42,36	43,72	42,3	42,7

Tabulka 4 Souhrn smluvních radiálních řezných sil pro jednotlivá procesní prostředí při broušení materiálu 14 220.3

Procesní prostředí	Smluvní radiální řezná síla [N]					Střední smluvní radiální řezná síla F _{SCN} [N]
	Měření číslo					
	1	2	3	4	5	
Vzduch	123,73	104,95	109,63	109,35	103,22	110,2
Voda	101,8	107,42	107,79	110,25	105,6	106,6
ESOK 1.0F	86,96	79,64	81,66	94,84	98,5	88,3
ESOK 1.0D	87,67	82,69	78,91	82,17	83,27	82,9
ESOK 1.0E	78,21	68,78	76,26	74,18	75,11	74,5
Cimstar 620	70,95	70,12	77,06	74,38	72,54	73,0
ESOK 1.1D	69,95	72,22	68,41	75,13	74,73	72,1
Grindex 10	66,06	75,27	68,77	75,43	72,65	71,6
Vasco 1000	69,79	66,87	66,42	69,49	75,23	69,6
ESOK 1.1B	63,01	67,83	64,8	65,15	72,28	66,6
Blasocut BC 35 Kombi	65,97	62,03	64,67	70,56	65,35	65,7
EOPS 1030	54,31	56,02	64,57	64,53	62,19	60,2
Hocut 795B	54,98	61,62	56,09	55,48	58,7	57,3

Tabulka 5 Souhrn smluvních radiálních řezných sil pro jednotlivá procesní prostředí při broušení materiálu 17 351



Graf č. 5 Souhrn středních smluvních radiálních řezných sil F_{SCN} pro jednotlivá řezná prostředí

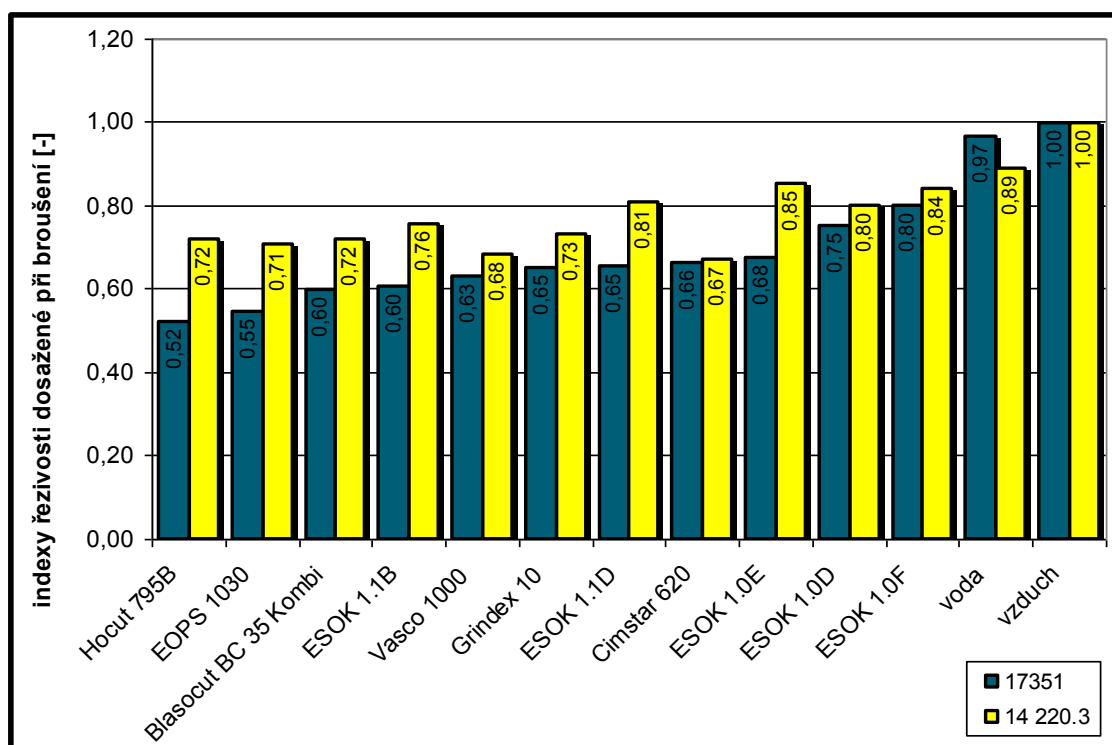
Z hodnot, které uvádí Tabulka 4 a Tabulka 5 jsou vypočtené indexy řezivosti i_R následující:

Procesní prostředí	Cimstar 620	Vasco 1000	EOPS 1030	Blasocut BC 350 Kombi	Hocut 795B	Grindex 10	ESOK 1.1B	ESOK 1.0D	ESOK 1.1D	ESOK 1.0F	ESOK 1.0E	voda	vzduch
i_R	0,67	0,68	0,71	0,72	0,72	0,73	0,76	0,80	0,81	0,84	0,85	0,89	1,00

Tabulka 6 Indexy řezivosti dosažené při obrábění materiálu 14 220.3 s použitím různých procesních kapalin

Procesní prostředí	Hocut 795B	EOPS 1030	Blasocut BC 35 Kombi	ESOK 1.1B	Vasco 1000	Grindex 10	ESOK 1.1D	Cimstar 620	ESOK 1.0E	ESOK 1.0D	ESOK 1.0F	voda	vzduch
i_R	0,52	0,55	0,60	0,60	0,63	0,65	0,65	0,66	0,68	0,75	0,80	0,97	1,00

Tabulka 7 Indexy řezivosti dosažené při obrábění materiálu 17 351 s použitím různých procesních kapalin



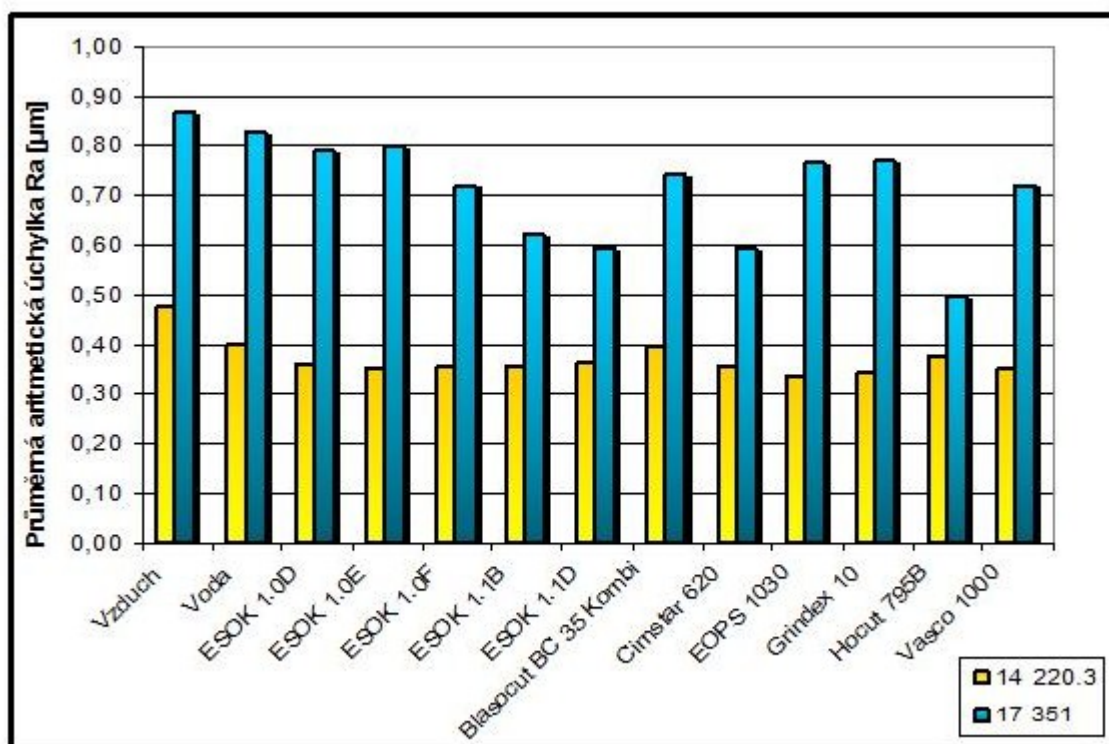
Graf č. 6 Srovnání indexů řezivosti při broušení materiálů 14 220.3 a 17 351 s použitím různých procesních kapalin

6.2 Porovnání drsnosti povrchu

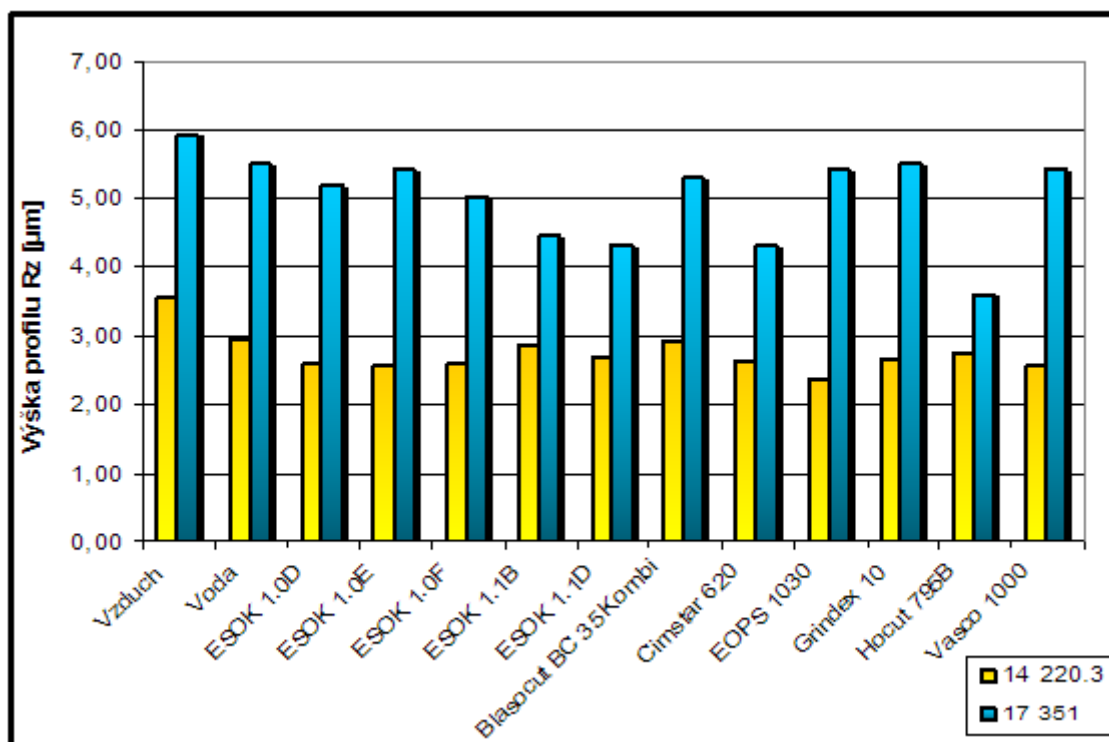
Účinek procesních kapalin se ukázal i na naměřené drsnosti povrchu. Očekávaný vliv byl takový, obdobně jako v případě měření řezných sil, že nejlépe hodnocená kapalina bude jedna a tatáž, jak pro ocel 14 220.3, tak pro ocel 17 351. V případě měření drsnosti povrchu se této shodě ovšem nedostalo. Nejlépe shrnuje výsledky pro jednotlivé typy měřených drsností Tabulka 8 a současně Graf č. 7, Graf č. 8 a Graf č. 9.

Procesní kapalina	Broušený materiál											
	14 220.3						17 351					
	Ra [μm]		Rz [μm]		C _{TP50} [μm]		Ra [μm]		Rz [μm]		C _{TP50} [μm]	
	Hodnota	Statistická odchylka	Hodnota	Statistická odchylka	Hodnota	Statistická odchylka	Hodnota	Statistická odchylka	Hodnota	Statistická odchylka	Hodnota	Statistická odchylka
Vzduch	0,476	0,02	3,547	0,33	2,638	0,37	0,867	0,07	5,941	0,55	3,616	0,21
Voda	0,399	0,03	2,944	0,24	1,988	0,40	0,827	0,06	5,515	0,51	3,485	0,42
ESOK 1.0D	0,361	0,02	2,578	0,18	1,412	0,14	0,791	0,10	5,190	0,55	3,393	0,53
ESOK 1.0E	0,352	0,02	2,573	0,23	1,309	0,09	0,802	0,08	5,429	0,43	3,382	0,55
ESOK 1.0F	0,356	0,02	2,581	0,12	1,312	0,11	0,721	0,11	5,021	0,68	3,025	0,50
ESOK 1.1B	0,357	0,02	2,872	0,47	1,430	0,30	0,623	0,05	4,475	0,31	2,911	0,50
ESOK 1.1D	0,362	0,03	2,684	0,27	1,269	0,10	0,595	0,07	4,309	0,45	2,881	0,63
Blasocut BC 35 Kombi	0,394	0,05	2,924	0,33	1,978	0,57	0,741	0,10	5,307	0,59	3,328	0,84
Cimstar 620	0,356	0,02	2,642	0,23	1,486	0,12	0,595	0,02	4,306	0,25	2,841	0,26
EOPS 1030	0,337	0,02	2,364	0,17	1,289	0,10	0,765	0,07	5,525	0,35	3,232	0,49
Grindex 10	0,344	0,03	2,660	0,28	1,509	0,34	0,770	0,06	5,507	0,40	3,480	0,36
Hocut 795B	0,373	0,02	2,750	0,18	1,534	0,26	0,497	0,03	3,590	0,39	2,593	0,23
Vasco 1000	0,350	0,02	2,560	0,11	1,593	0,21	0,721	0,08	5,422	0,75	3,414	1,16

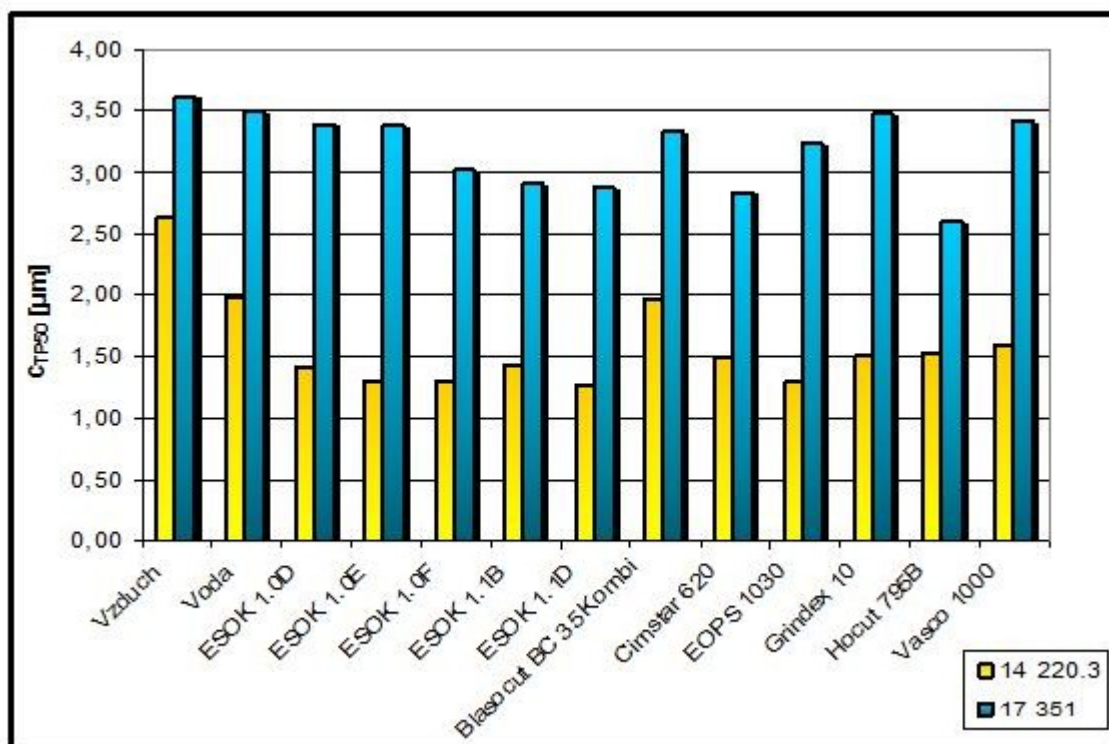
Tabulka 8 Souhrn dosažených drsností v závislosti na použitém procesním médiu



Graf č. 7 Souhrn průměrných aritmetických úchylek Ra pro jednotlivá řezná prostředí



Graf č. 8 Souhrn největších výšek profilu Rz pro jednotlivá řezná prostředí



Graf č. 9 Souhrn c_{TP50} pro jednotlivá řezná prostředí

7 Shrnutí a zhodnocení dosažených výsledků a vyvození závěrů

Dle porovnání vlivu různých prostředí na řezivost při broušení konstrukční oceli 14 220.3 vyplývá, že při použití vody se zlepšila řezivost o 11%, pro kapaliny ESOK 1.0E, ESOK 1.0F, ESOK 1.1D a ESOK 1.0D došlo ke zlepšení obdobnému, tzn. o 14,6 – 20%, při použití kapaliny Cimstar 620 či Vasco 1000 můžeme očekávat zlepšení řezivosti o cca 31,7 – 32,8% ve srovnání s broušením bez kapaliny (tzv. za sucha). Ostatní procesní kapaliny jsou na tom přibližně rovnocenně – tzn., že došlo ke zlepšení řezivosti o cca 25 – 30%. Jak ovšem zobrazuje Tabulka 6, rozsahy mezi jednotlivými kapalinami jsou velmi malé

Dle porovnání vlivu různých prostředí na řezivost při broušení nerezové oceli 17 351 vyplývá, že při použití vody se řezivost zlepšila o pouhých 3%, pro kapaliny ESOK 1.0F, ESOK 1.0D a ESOK 1.0E došlo ke zlepšení přibližně o 20 – 30%, při použití kapaliny Hocut 795B či EOPS 1030 můžeme očekávat zlepšení řezivosti o cca 45,4 – 48% ve srovnání s broušením bez kapaliny (tzv. za sucha). Ostatní procesní kapaliny jsou na tom přibližně rovnocenně – tzn., došlo ke zlepšení řezivosti o cca 32 – 40%. Při broušení materiálu 17 351 je vliv různých kapalin lépe patrný. To je způsobeno tím, že tento materiál je hůře obrobitelný než materiál 14 220.3 a díky tomu je vliv chladicího a mazacího účinku procesních kapalin markantnější.

Z porovnání vlivu různých procesních prostředí na průměrnou aritmetickou úchylku povrchu R_a při broušení konstrukční oceli 14 220.3 vyplývá, že při použití vody se projevilo zlepšení drsnosti povrchu o 16% ($R_a=0,399$) obdobně jako při použití kapaliny Blasocut BC 35 Kombi (zlepšení o 17,1%, $R_a=0,394$). Nejlépe hodnocená vychází kapalina EOPS 1030, kde dochází ke zlepšení parametru R_a o 29,1% ($R_a=0,337$) v porovnání s broušením za sucha. Všechny ostatní kapaliny se pohybovaly zlepšením v rozsahu od 21,6 do 27,6% ($R=0,344 – 0,373$).

Z porovnání vlivu různých prostředí na průměrnou aritmetickou úchylku povrchu R_a při broušení nerezové oceli 17 351 vyplývá, že při použití vody se projevilo zlepšení průměrné aritmetické úchylky R_a o 4,6% ($R_a=0,827$). Při použití kapalin ESOK 1.0E ($R_a=0,802$), ESOK 1.0D ($R_a=0,791$) došlo k zlepšení o 7,5 - 8,7%. Při použití kapalin

Grindex 10 ($R_a=0,770$), EOPS 1030 ($R_a=0,765$) nebo Blasocut BC 35 Kombi ($R_a=0,741$) se parametr drsnosti povrchu R_a zlepšil o 11,1 - 14,5%. Použitím kapalin ESOK 1.0F ($R_a=0,721$) nebo Vasco 1000 ($R_a=0,721$) můžeme očekávat zlepšení o 16,9 %. Velké zlepšení parametru R_a můžeme dosáhnout při použití kapalin ESOK1.1B ($R_a=0,623$), Cimstar 620 ($R_a=0,595$) nebo ESOK 1.1D ($R_a=0,595$) a to o 28,1 - 31,4% ve srovnání s broušením bez kapaliny (za sucha – $R_a=0,867$). Nejlépe hodnocená vychází kapalina Hocut 795B ($R_a=0,497$), kde dochází ke zlepšení aritmetické úchytky povrchu R_a o 42,6% v porovnání s broušením za sucha.

Vzhledem k tomu, že broušení se obvykle používá, jako dokončovací operace, a tedy za účel získání lepší kvality povrchu nebo vyšší přesnosti, lze konstatovat, že nejvhodnější kapalinou pro obrábění oceli 14 220.3 se jeví kapalina EOPS 1030 a pro obrábění oceli 17 351 se jako nejvhodnější jeví kapalina Hocut 795B. Současně se kapalina Hocut 795B jeví jako nejlepší i z hlediska řezivosti při broušení materiálu 17 351. Kapalina EOPS 1030 sice nepřináší nejlepší zlepšení řezivosti a tím pádem ani nejvýznamnější prodloužení trvanlivosti řezného nástroje, ale při broušení materiálu 14 220.3 jsou rozdíly vlivů procesních kapalin na řezivost brousícího kotouče, při porovnání kapaliny EOPS 1030 a nejlépe hodnocené kapaliny Cimstar 620, malé a lze tedy tento nižší zlepšení řezivosti zanedbat.

Z výše uvedených důvodů lze konstatovat, že z použitých kapalin se jako nejvhodnější doporučení pro použití v praxi jeví právě kapaliny Hocut 795B a EOPS 1030.

8 Seznam použitých zdrojů

- [1] ČSN ISO 8688-1. *Testovanie trvanlivosti při frézovanie: Časť 1: Rovinné frézovanie*. 1993.
- [2] DILLINGER, Josef a kolektiv: *Moderní strojírenství pro školu i praxi*, 1. vyd., Praha: Europa-Sobotáles cz, 2007, kapitola: Broušení, s. 171-182, ISBN 978-80-86706-19-1
- [3] DOBEŠ, P.: Současné trendy v oblasti kapalin pro obrábění, *MM průmyslové spektrum*, květen 2007, č. 5, s. 54, [cit. 15. dubna 2013], dostupné na: <http://www.mmspektrum.com/clanek/soucasne-trendy-v-oblasti-kapalin-pro-obrabeni.html>
- [4] HOLEŠOVSKÝ, F., JERSÁK, J., aj.: *Terminologie obrábění a montáže*, 1. vyd. Ústí nad Labem: Universita J. E. Purkyně, ÚTRV, 2005, Kapitola: Teorie a technologie obrábění, s. 7-66, ISBN 80-7044-616-1.
- [5] KOCMAN, Karel akol.: *Aktuální příručka pro technický úsek – Obrábění*, Praha: Verlag Dashofer, 2001, ISBN 80-90224-2-5
- [6] KOCMAN, Karel, PROKOP, Jaroslav: *Technologie obrábění*, 2. vyd., Brno: Akademické nakladatelství CERM Brno, s.r.o., 2005; 270 s., ISBN 80-214-3068-0
- [7] KOCMAN, Karel, ZEMČÍK, Oskar: *Web.tuke.sk: Analysis of Thermodynamic Effects when Grinding*, Analýza termodynamických jevů při broušení, [cit. 5. března 2013], dostupné na: <http://web.tuke.sk/fvtpo/journal/pdf08/2-str-14-16.pdf>
- [8] KOLNEROVÁ, M.: *Mikrogeometrie povrchu povlaků*, [cit. 7. května 2013], na: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/spt/povrchy%20povlaku.pdf
- [9] KREJČÍK, L.: Kapaliny pro obrábění; *MM průmyslové spektrum*, červen 2011, č. 7, s. 22, [cit. 15. dubna 2013], dostupné online na: <http://www.mmspektrum.com/clanek/kapaliny-pro-obrabeni.html>
- [10] LEINVEBER, Jan, ŘASA, Jaroslav, VÁVRA, Pavel: *Strojnické tabulky*, Praha: Scientia, spol. s.r.o.

- [11] MADL, Jan: *Řezné kapaliny v současné technologii obrábění*. In: *Sborník vědeckých prací*, Ekologie obrábění, Strojírenská technologie - knihovnička, sv. 1, Univerzita J. E. Purkyně, ÚTRV, 2000, ISBN 80-7044-232-8.
- [12] MASLOV, J. N.: *Teorie broušení kovů*, Překlad: Klůna, Jindřich, 1. vyd., Praha: SNTL, 1979, 248 s
- [13] Materiálové listy použitých procesních kapalin.
- [14] PETŘÍK, Václav: *Využití různých systémů chlazení pro obrábění materiálů: Diplomová práce*, UTB ve Zlíně, 2011
- [15] Popov, Alexey: *Obrobitelnost materiálů a řezivost řezných nástrojů* (podklad pro výuku Teorie obrábění), [cit. 3. května 2013], dostupné na http://www.techno-mat.cz/data/katedry/kom/KOM_TO_PR_13_CZE_Popov_Obrobitelnost_materialu_a_rezivost_reznych_nastroju.pdf
- [16] VOTOČEK, J.: Zvláštnosti praktického používání dynamometru Kistler při broušení s procesními kapalinami. In: *Strojírenská technologie – Plzeň 2009*, Sborník s CD, 1. vyd., Plzeň: Plzeň, 2009, s. 17, ISBN 978-80-7043-750-6

9 Seznam použitých obrázků

Obr. 1 Model záběru brousicího zrna [6].....	13
Obr. 2 Vybrané způsoby obvodového broušení [6].....	15
Obr. 3 Vybrané způsoby čelního broušení [6].....	15
Obr. 4 Označení brousicího kotouče dle ČSN ISO 525 [2].....	16
Obr. 5 Označení struktury [2]	17
Obr. 6 Struktura brusného kotouče [2]	18
Obr. 7 Schéma procesu mikrořezání v případě zaobleného řezného elementu [12].....	19
Obr. 8 Základní způsoby opotřebení brousicího kotouče [12]	20
Obr. 9 Světově používaná zkouška řezivosti	21
Obr. 10 Ukázka záznamu vyjiskřovací křivky [15]	22
Obr. 11 Vyjiskřovací křivka [15]	23
Obr. 12 Přívod řezné kapaliny do místa řezu [6]	30
Obr. 13 Vnitřní chlazení brousicího kotouče [6]	32
Obr. 14 Požadavek na chladicí/mazací účinek kapaliny v závislosti na typu obrábění [9].	36
Obr. 15 Místa měření drsnosti povrchu zkušební vzorku	42
Obr. 16 Profilová křivka drsnosti povrchu [8].....	42
Obr. 17 Abbottova křivka nosného podílu [8].....	42
Obr. 18 Vzorky materiálů	44
Obr. 19 Brousicí kotouč.....	46
Obr. 20 Rovinná bruska BPH 320 A	47
Obr. 21 Ruční refraktometr Optech Brix	50
Obr. 22 Měrná stupnice refraktometru	50
Obr. 23 Schéma dynamometru KISTLER [12]	51
Obr. 24 Vzorek materiálu 14 220.3	52
Obr. 25 Upnutí vzorku ve strojním svěráku	52
Obr. 26 Dynamometr KISTLER upnutý na magnetické desce pracovního stolu.....	53
Obr. 27 Ustavení mezery mezi vertikálním senzorem a broušeným materiálem	53
Obr. 28 Orovnaný kotouč	54
Obr. 29 Čerpadlo pro dopravu procesní kapaliny	55
Obr. 30 Flexibilní krk s tryskou a magnetickým upínáním	55
Obr. 31 Zabalené vzorky pro měření drsnosti	56
Obr. 32 Připravený vzorek pro měření drsnosti.....	56
Obr. 33 Profiloměr Mitutoyo Surftest SV-2000N2	57
Obr. 34 Dotykový snímač pro měření drsnosti povrchu.....	57
Obr. 35 Měření drsnosti na profiloměru Mitutoyo Surftest SV-2000N2 v laboratoři KOM	58
Obr. 36 Profilová a Abbottova křivka z programu Surfpak	59

10 Seznam grafů

Graf č. 1 Souhrnný graf měřených sil	38
Graf č. 2 Detail souhrnného grafu měřených sil	38
Graf č. 3 Záznam všech hodnot měřené řezné síly F_{CN} z dynamometru KISTLER při broušení za sucha	39
Graf č. 4 Průběh velikosti střední radiální řezné síly FCN při jednotlivých zdvizech stolu při broušení za sucha	40
Graf č. 5 Souhrn středních smluvních radiálních řezných sil F_{SCN} pro jednotlivá řezná prostředí	61
Graf č. 6 Srovnání indexů řezivosti při broušení materiálů 14 220.3 a 17 351 s použitím různých procesních kapalin	62
Graf č. 7 Souhrn průměrných aritmetických úchylek Ra pro jednotlivá řezná prostředí	64
Graf č. 8 Souhrn největších výšek profilu Rz pro jednotlivá řezná prostředí	64
Graf č. 9 Souhrn c_{TP50} pro jednotlivá řezná prostředí	65

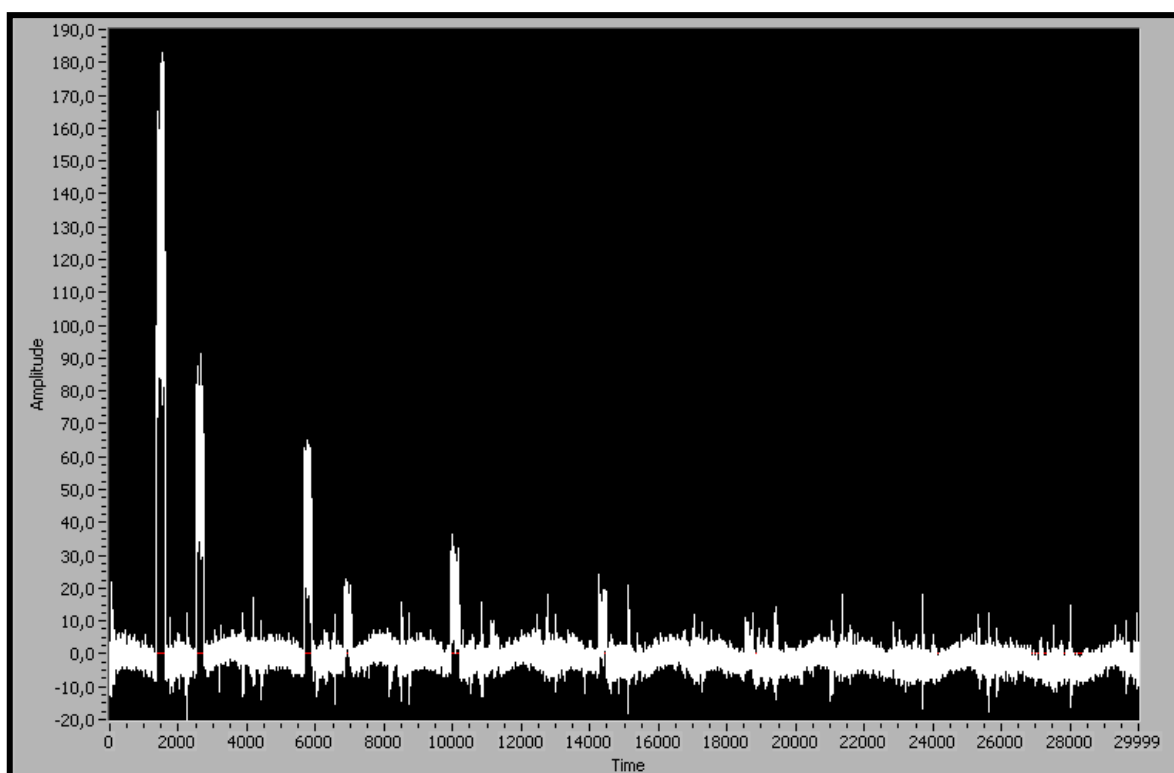
11 Seznam tabulek

Tabulka 1 Vyhodnocení sil při jednotlivých zdvizech stroje	39
Tabulka 2 Smluvní radiální řezná síla, řezným prostředím je vzduch.....	40
Tabulka 3 Střední smluvní radiální řezná síla	41
Tabulka 4 Souhrn smluvních radiálních řezných sil pro jednotlivá procesní prostředí při broušení materiálu 14 220.3	60
Tabulka 5 Souhrn smluvních radiálních řezných sil pro jednotlivá procesní prostředí při broušení materiálu 17 351	61
Tabulka 6 Indexy řezivosti dosažené při obrábění materiálu 14 220.3 s použitím různých procesních kapalin.....	62
Tabulka 7 Indexy řezivosti dosažené při obrábění materiálu 17 351 s použitím různých procesních kapalin.....	62
Tabulka 8 Souhrn dosažených drsností v závislosti na použitém procesním médiu	63

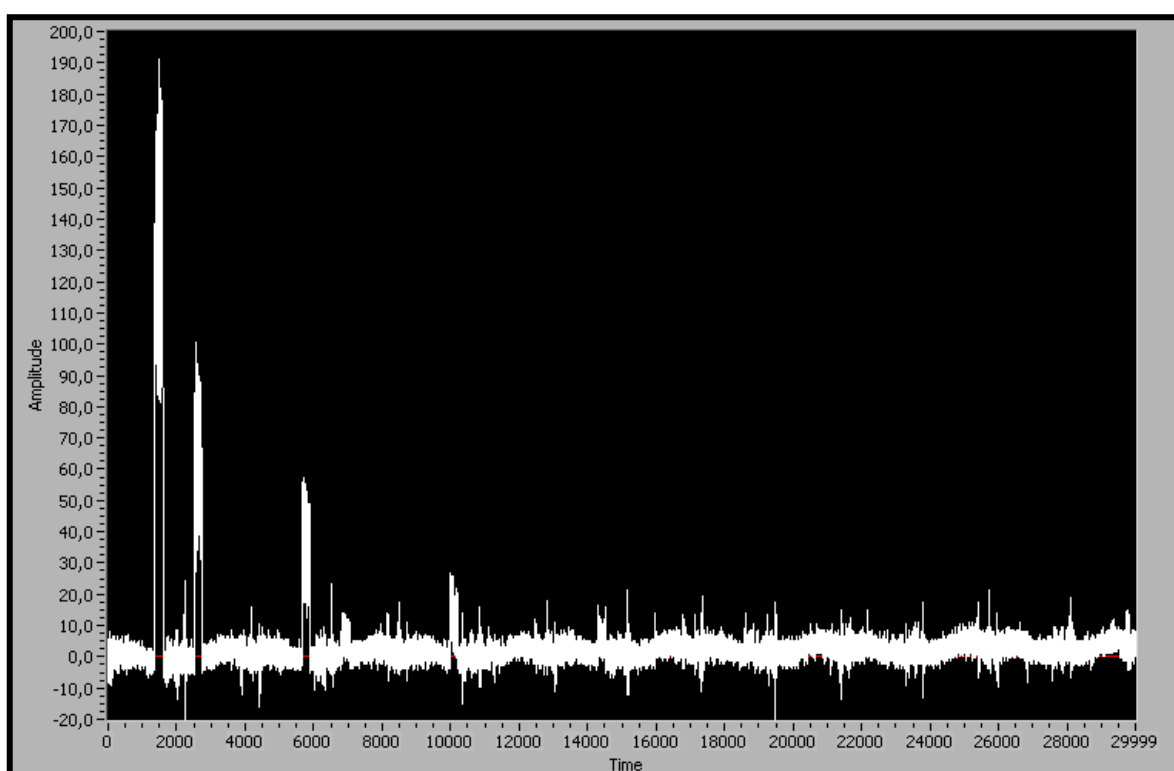
12 Seznam příloh

- Příloha č. I Grafický záznam hodnot měření řezné síly F_{CN} z dynamometru při broušení materiálu 14 220.3, kdy řezným médiem byl vzduch a voda.
- Příloha č. II Grafický záznam hodnot měření řezné síly F_{CN} z dynamometru KISTLER při broušení materiálu 14 220.3, kdy řezným médiem byla kapalina ESOK 1.0E a ESOK 1.0F.
- Příloha č. III Grafický záznam hodnot měření řezné síly F_{CN} z dynamometru KISTLER při broušení materiálu 14 220.3, kdy řezným médiem byla kapalina ESOK 1.1B a ESOK 1.1D.
- Příloha č. IV Grafický záznam hodnot měření řezné síly F_{CN} z dynamometru KISTLER při broušení materiálu 14 220.3, kdy řezným médiem byla kapalina ESOK 1.0D a EOPS 1030.
- Příloha č. V Grafický záznam hodnot měření řezné síly F_{CN} z dynamometru KISTLER při broušení materiálu 14 220.3, kdy řezným médiem byla kapalina Hocut 795B a Blasocut BC 35 Kombi.
- Příloha č. VI Grafický záznam hodnot měření řezné síly F_{CN} z dynamometru KISTLER při broušení materiálu 14 220.3, kdy řezným médiem byla kapalina Vasco 1000 a Grindex 10.
- Příloha č. VII Grafický záznam hodnot měření řezné síly F_{CN} z dynamometru KISTLER při broušení materiálu 14 220.3, kdy řezným médiem byla kapalina Cimstar 620.
- Příloha č. VIII Grafický záznam hodnot měření řezné síly F_{CN} z dynamometru KISTLER při broušení materiálu 17 351, kdy řezným médiem byl vzduch a voda.
- Příloha č. IX Grafický záznam hodnot měření řezné síly F_{CN} z dynamometru KISTLER při broušení materiálu 17 351, kdy řezným médiem byla kapalina ESOK 1.0E a ESOK 1.0F.
- Příloha č. X Grafický záznam hodnot měření řezné síly F_{CN} z dynamometru KISTLER při broušení materiálu 17 351, kdy řezným médiem byla kapalina ESOK 1.1B a ESOK 1.1D.

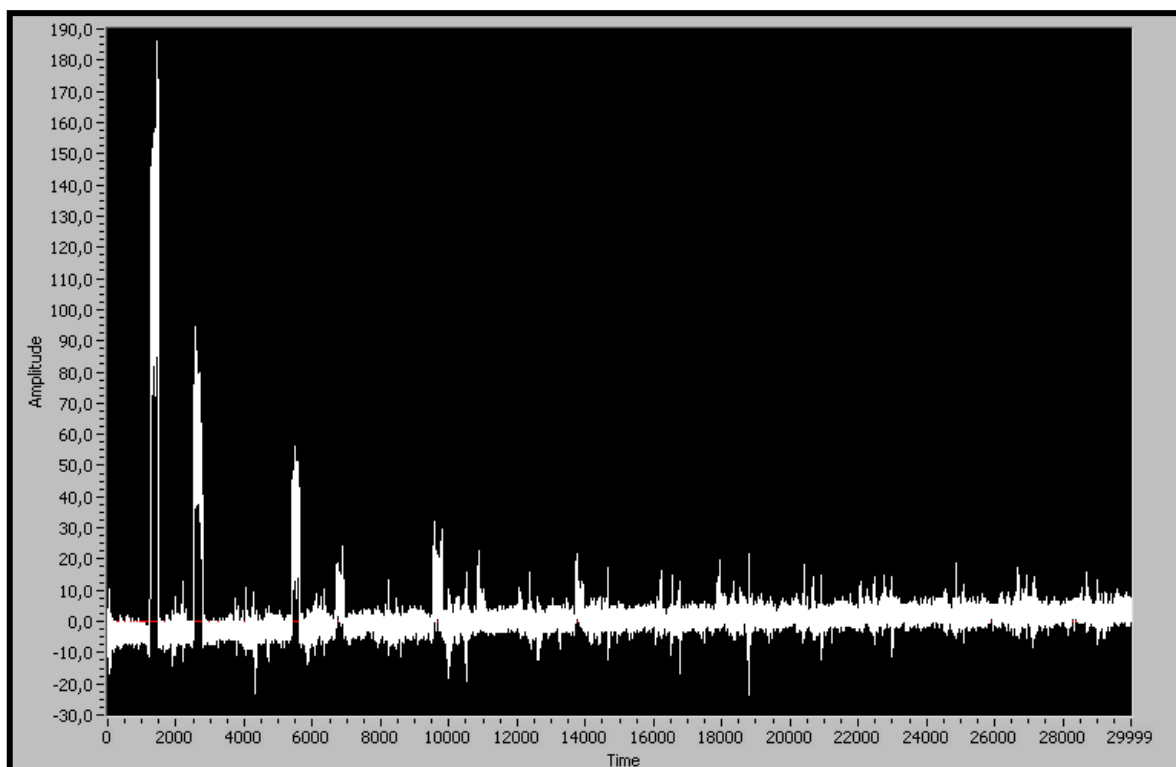
- Příloha č. XI Grafický záznam hodnot měření řezné síly F_{CN} z dynamometru KISTLER při broušení materiálu 17 351, kdy řezným médiem byla kapalina ESOK 1.0D a EOPS 1030.
- Příloha č. XII Grafický záznam hodnot měření řezné síly F_{CN} z dynamometru KISTLER při broušení materiálu 17 351, kdy řezným médiem byla kapalina Hocut 795B a Blasocut BC 35 Kombi.
- Příloha č. XIII Grafický záznam hodnot měření řezné síly F_{CN} z dynamometru KISTLER při broušení materiálu 17 351, kdy řezným médiem byla kapalina Vasco 1000 a Grindex 10.
- Příloha č. XIV Grafický záznam hodnot měření řezné síly F_{CN} z dynamometru KISTLER při broušení materiálu 17 351, kdy řezným médiem byla kapalina Cimstar 620.
- Příloha č. XV Tabulka všech naměřených drsností při broušení materiálu 14 220.3.
- Příloha č. XVI Tabulka všech naměřených drsností při broušení materiálu 17 351.
- Příloha č. XVII Grafický přehled řezných sil dosažených při broušení pro oba materiály.
- Příloha č. XVIII Grafický přehled dosažených drsností při broušení materiálu 14 220.3.
- Příloha č. XIX Grafický přehled dosažených drsností při broušení materiálu 17 351.
- Příloha č. XX Materiálové listy procesních kapalin.



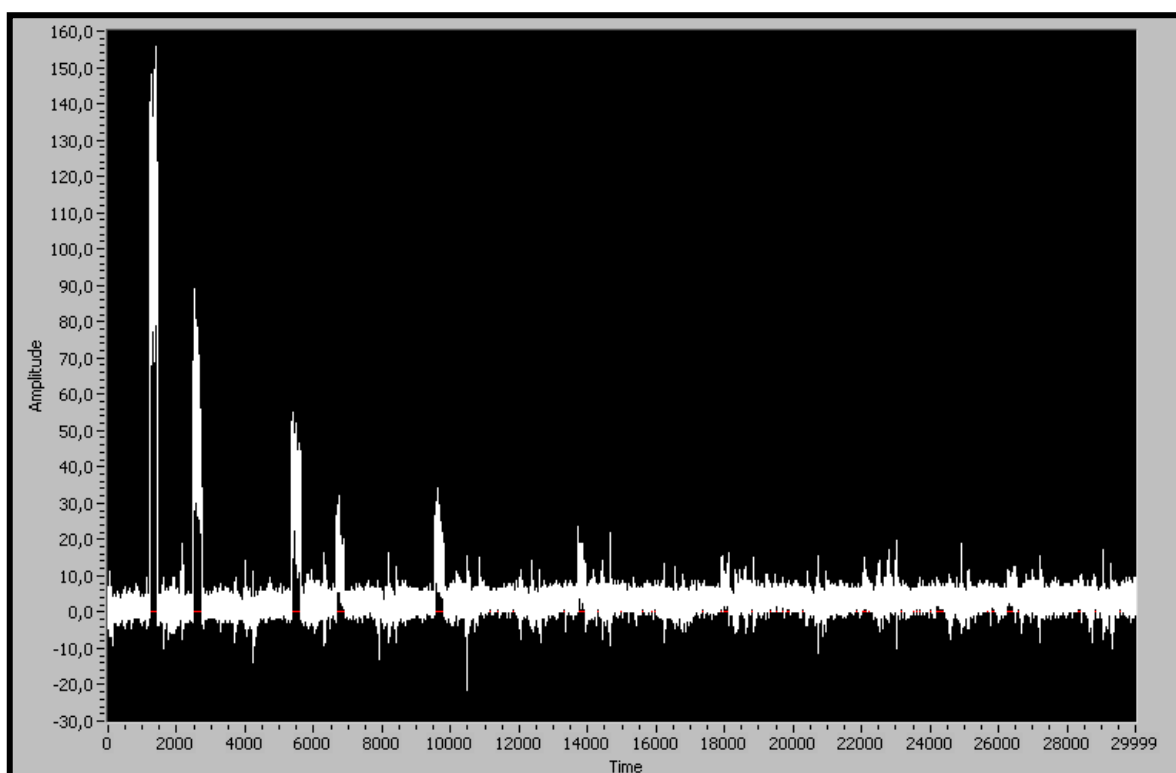
Záznam všech hodnot měřené řezné síly F_{CN} z dynamometru KISTLER při broušení materiálu **14 220.3** a použití procesního média **vzduchu**.



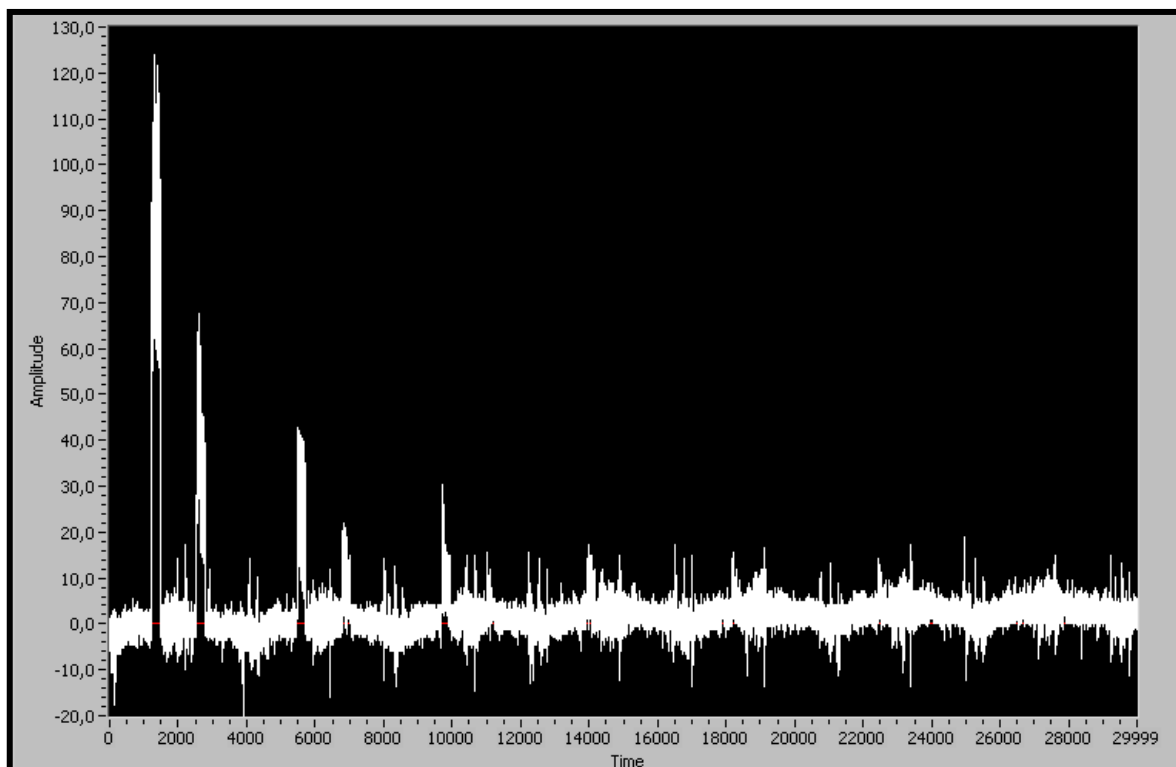
Záznam všech hodnot měřené řezné síly F_{CN} z dynamometru KISTLER při broušení materiálu **14 220.3** a použití procesního média **vody**.



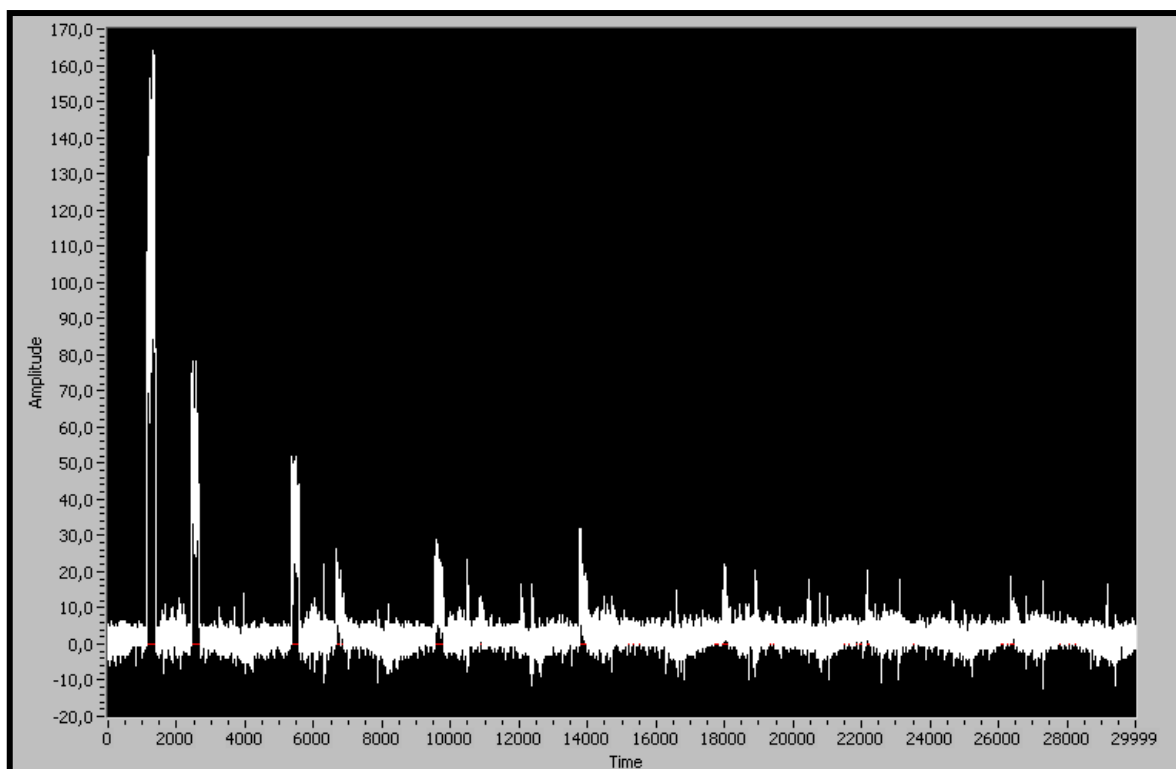
Záznam všech hodnot měřené řezné síly F_{CN} z dynamometru KISTLER při broušení materiálu **14 220.3** a použití procesní kapaliny **ESOK 1.0E**.



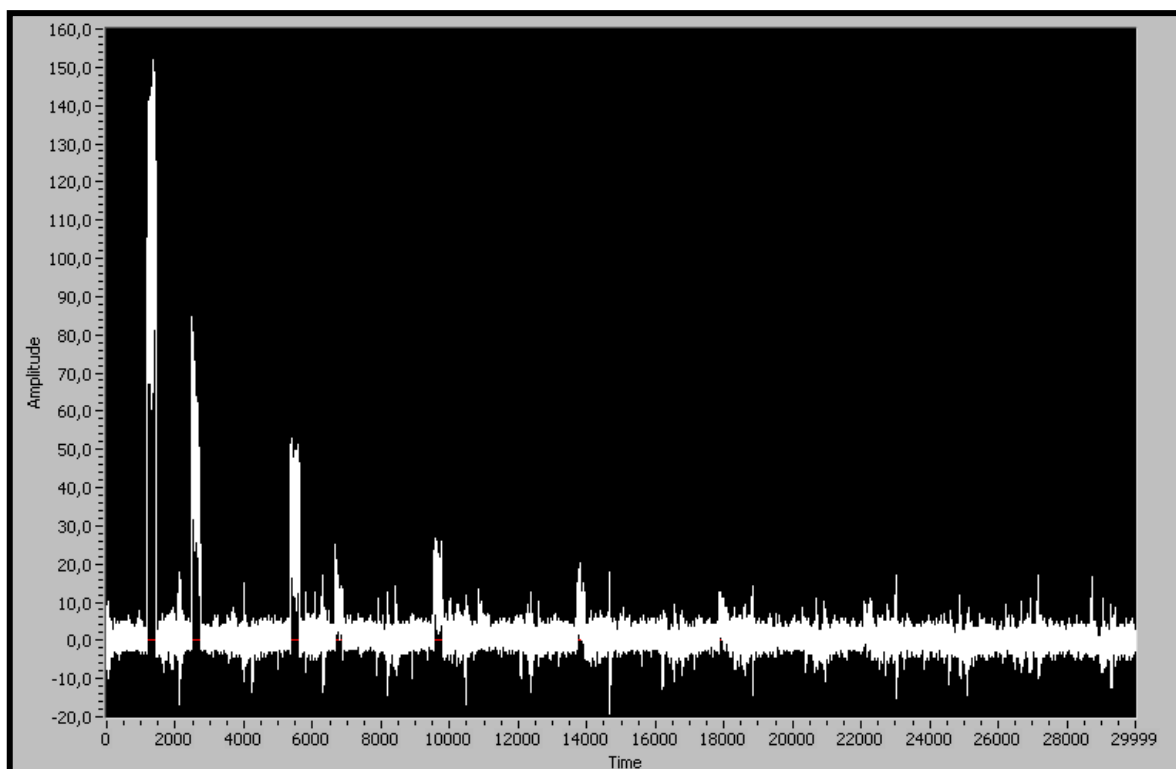
Záznam všech hodnot měřené řezné síly F_{CN} z dynamometru KISTLER při broušení materiálu **14 220.3** a použití procesní kapaliny **ESOK 1.0F**.



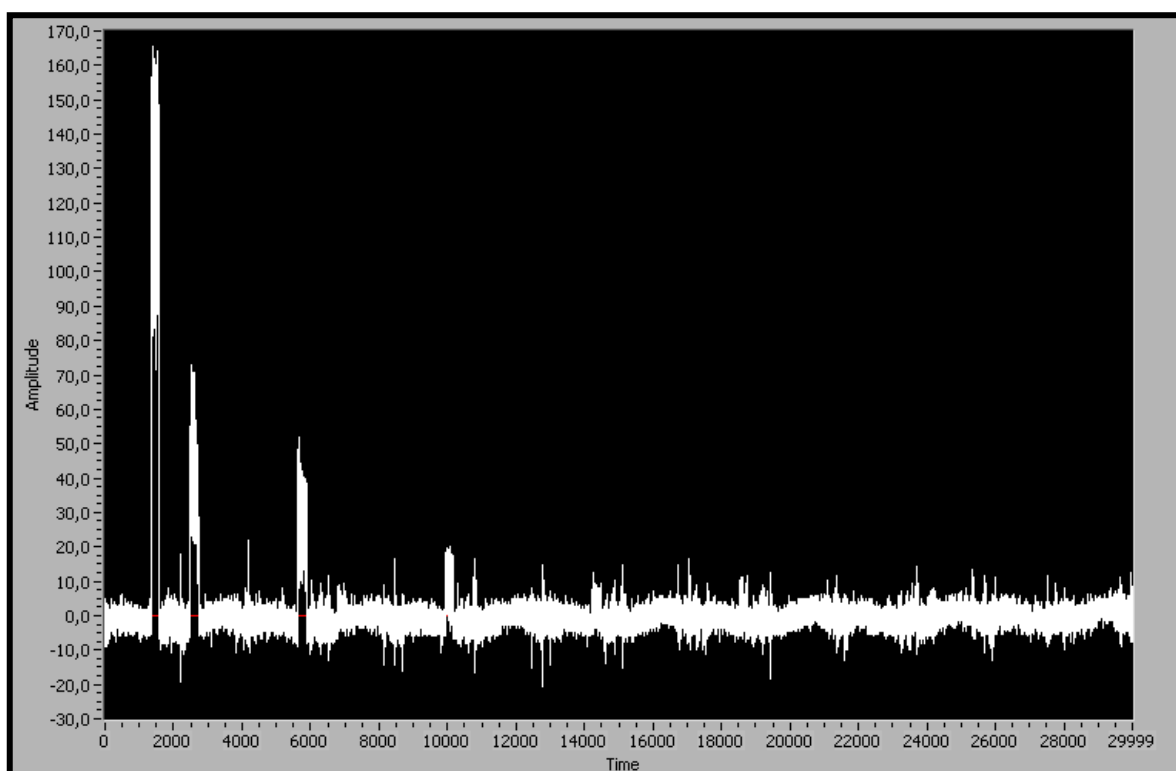
Záznam všech hodnot měřené řezné síly F_{CN} z dynamometru KISTLER při broušení materiálu **14 220.3** a použití procesní kapaliny **ESOK 1.1B**.



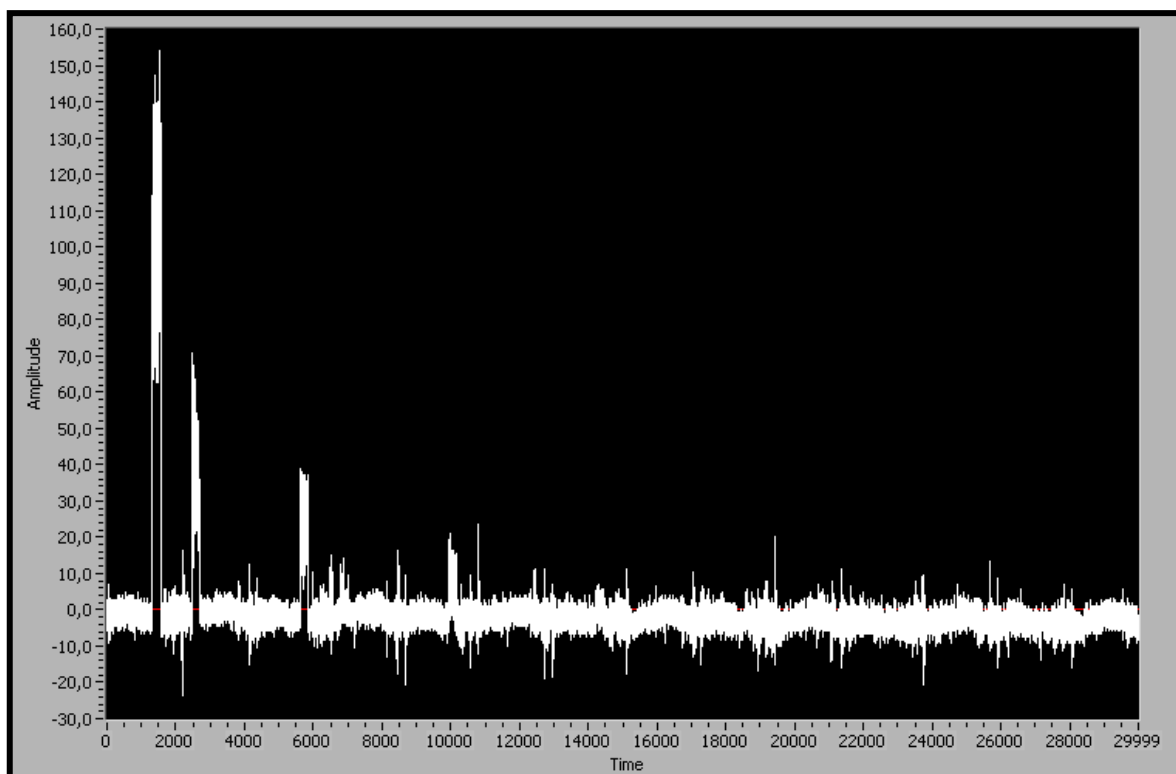
Záznam všech hodnot měřené řezné síly F_{CN} z dynamometru KISTLER při broušení materiálu **14 220.3** a použití procesní kapaliny **ESOK 1.1D**.



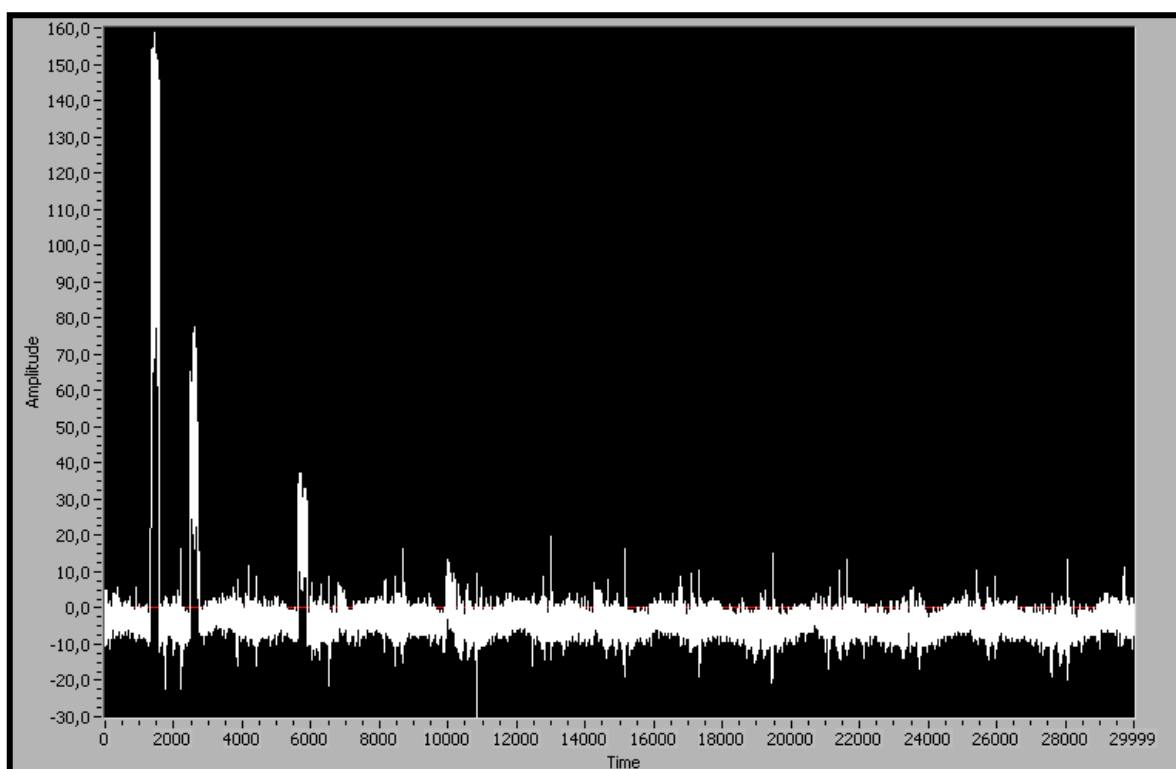
Záznam všech hodnot měřené řezné síly F_{CN} z dynamometru KISTLER při broušení materiálu **14 220.3** a použití procesní kapaliny **ESOK 1.0D**.



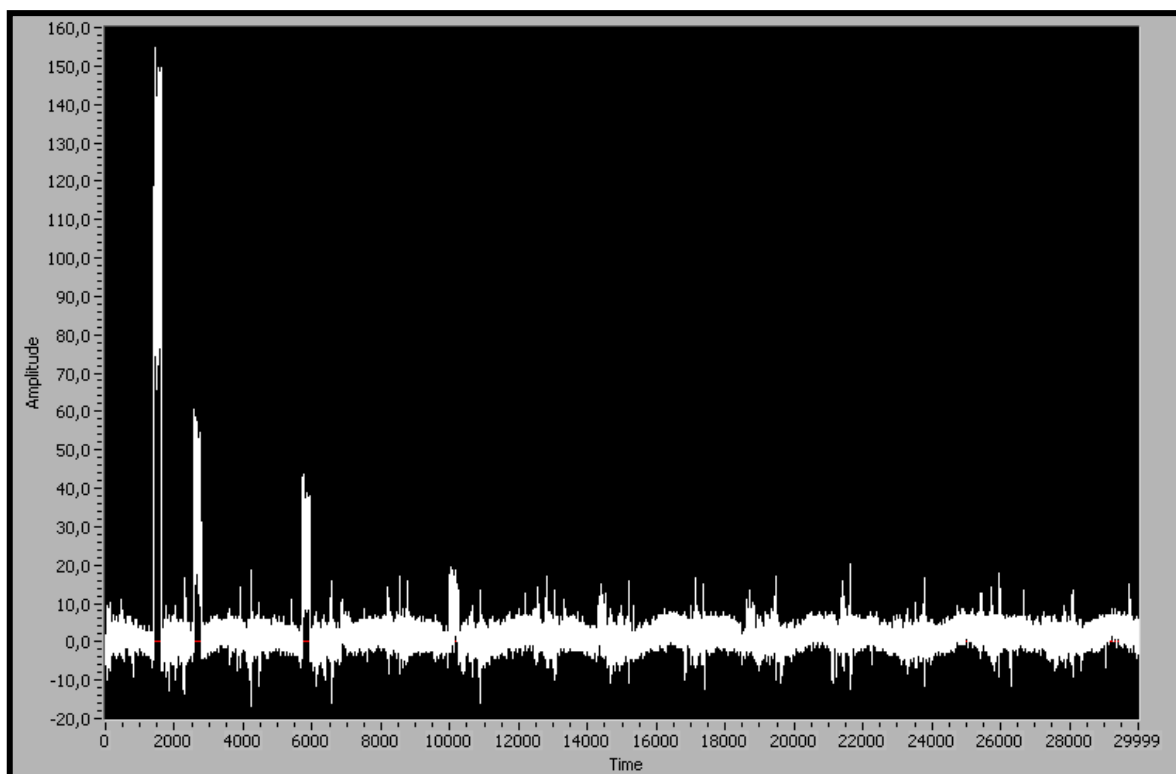
Záznam všech hodnot měřené řezné síly F_{CN} z dynamometru KISTLER při broušení materiálu **14 220.3** a použití procesní kapaliny **EOPS 1030**.



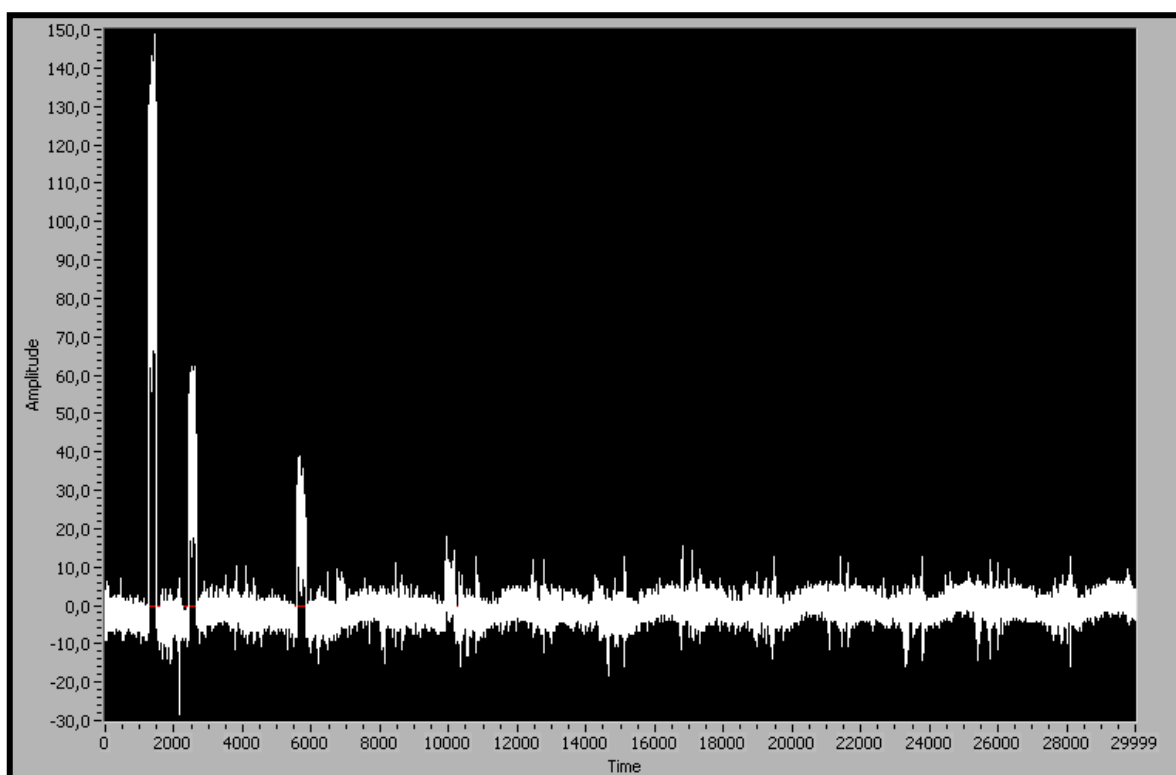
Záznam všech hodnot měřené řezné síly F_{CN} z dynamometru KISTLER při broušení materiálu **14 220.3** a použití procesní kapaliny **Hocut 795B**.



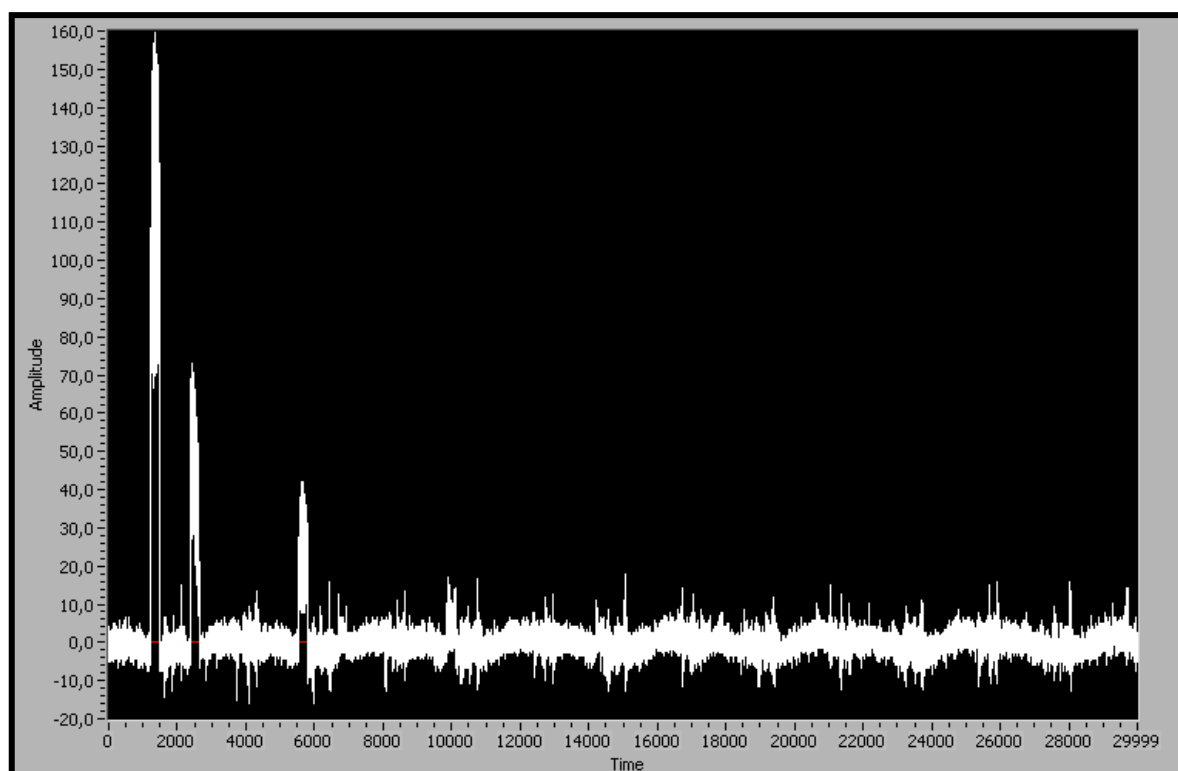
Záznam všech hodnot měřené řezné síly F_{CN} z dynamometru KISTLER při broušení materiálu **14 220.3** a použití procesní kapaliny **Blasocut BC 35 Kombi**.



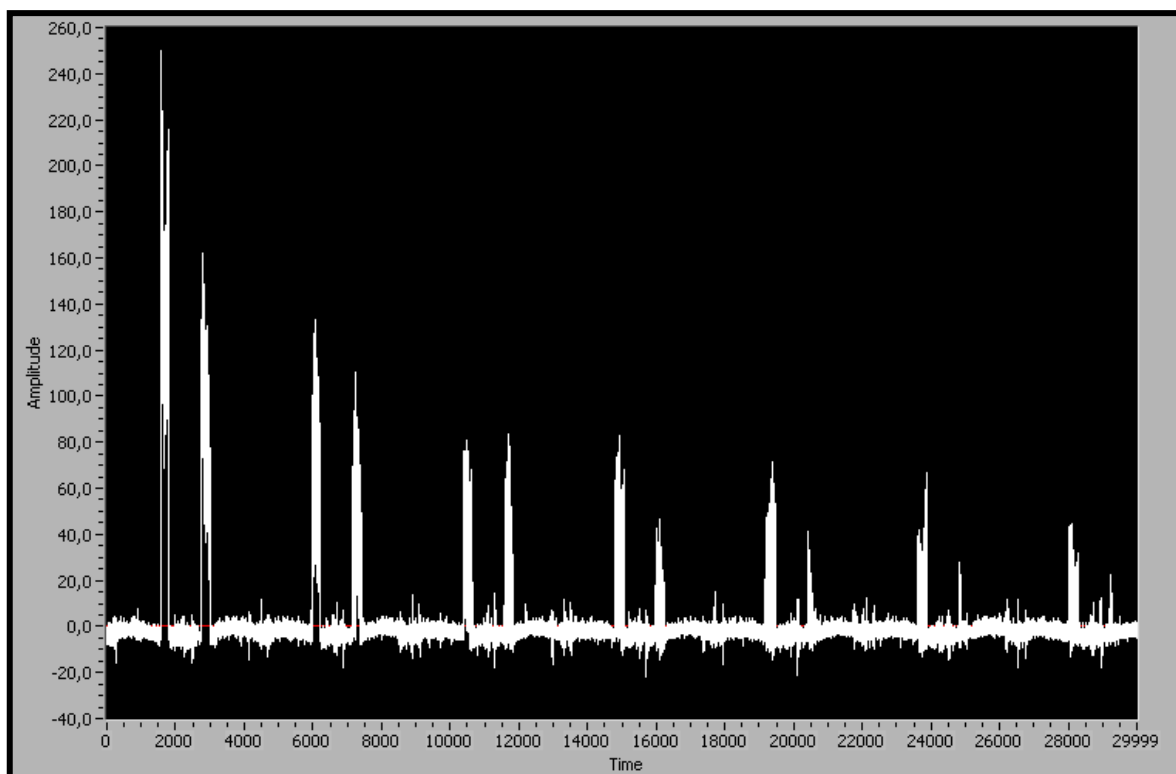
Záznam všech hodnot měřené řezné síly F_{CN} z dynamometru KISTLER při broušení materiálu **14 220.3** a použití procesní kapaliny **Vasco 1000**.



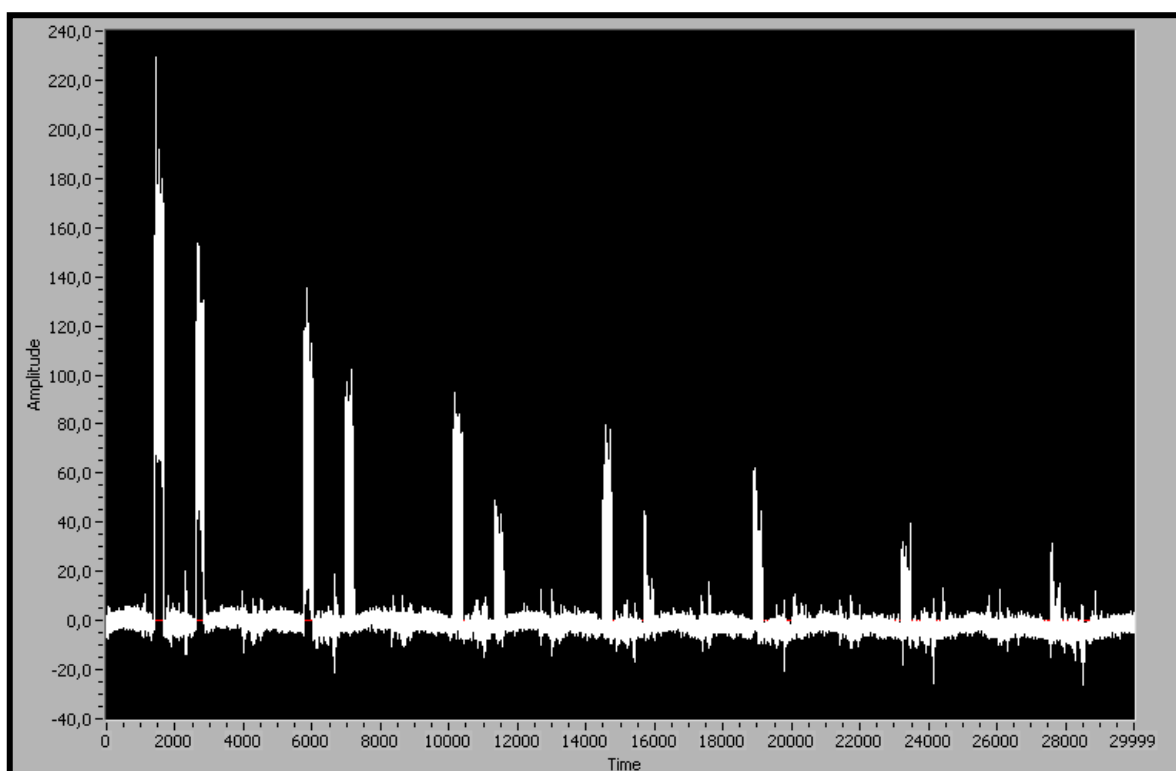
Záznam všech hodnot měřené řezné síly F_{CN} z dynamometru KISTLER při broušení materiálu **14 220.3** a použití procesní kapaliny **Grindex 10**.



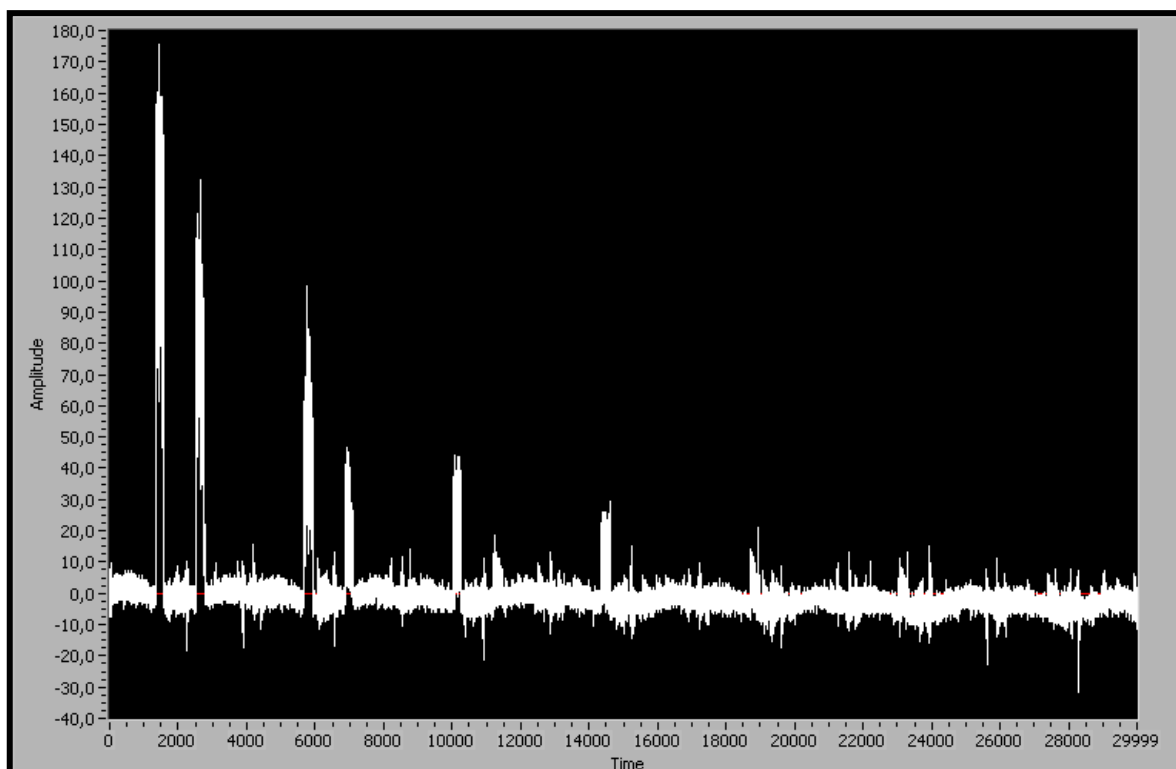
Záznam všech hodnot měřené řezné síly F_{CN} z dynamometru KISTLER při broušení materiálu **14 220.3** a použití procesní kapaliny **Cimstar 620**.



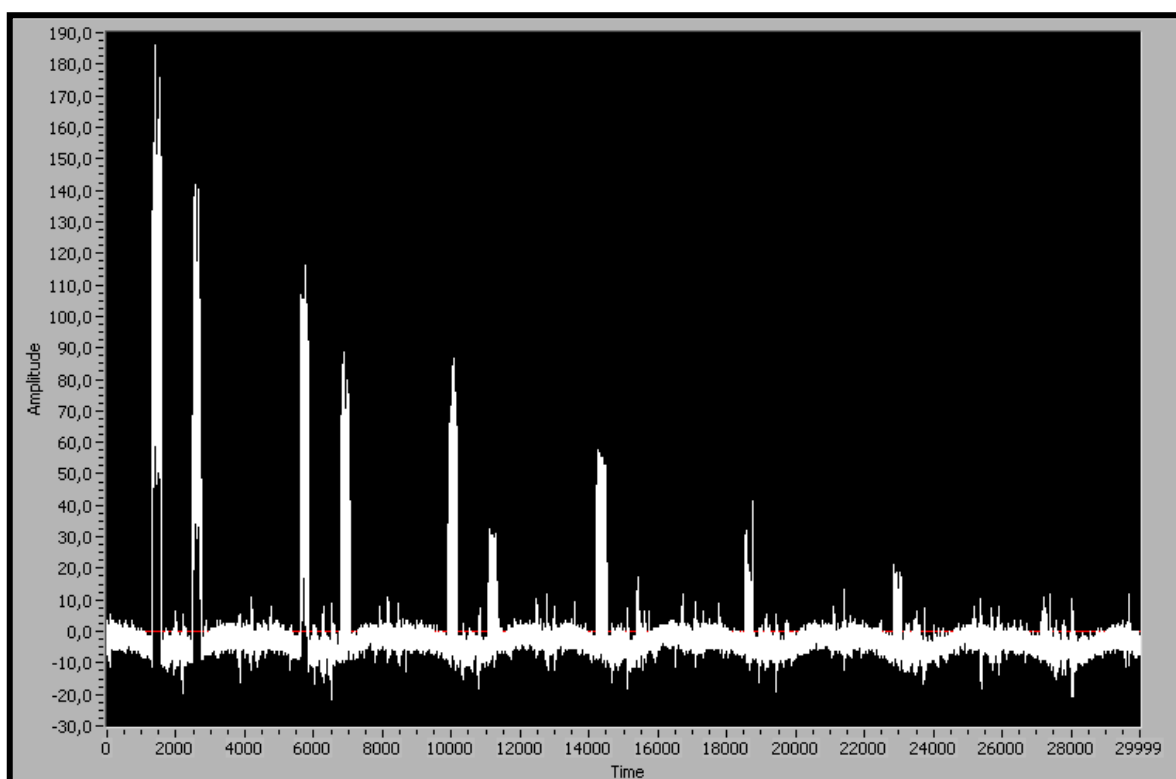
Záznam všech hodnot měřené řezné síly F_{CN} z dynamometru KISTLER při broušení materiálu **17 351** a použití procesního média **vzduchu**.



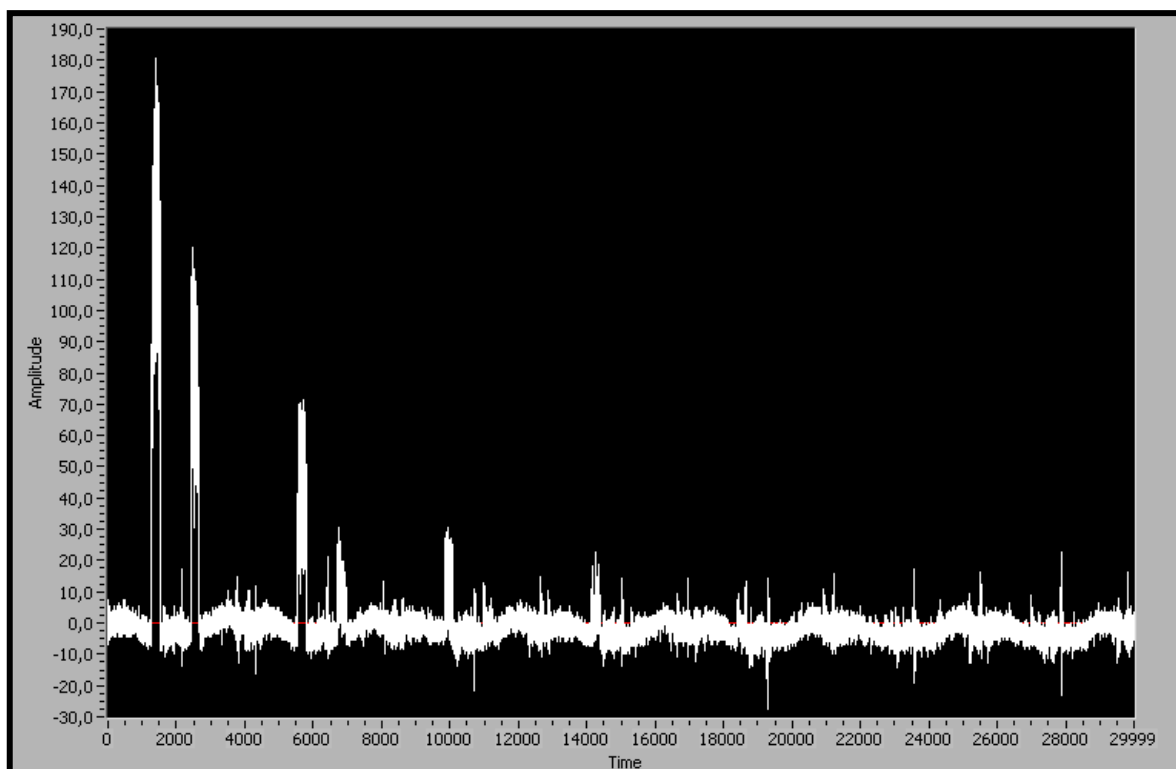
Záznam všech hodnot měřené řezné síly F_{CN} z dynamometru KISTLER při broušení materiálu **17 351** a použití procesního média **vody**.



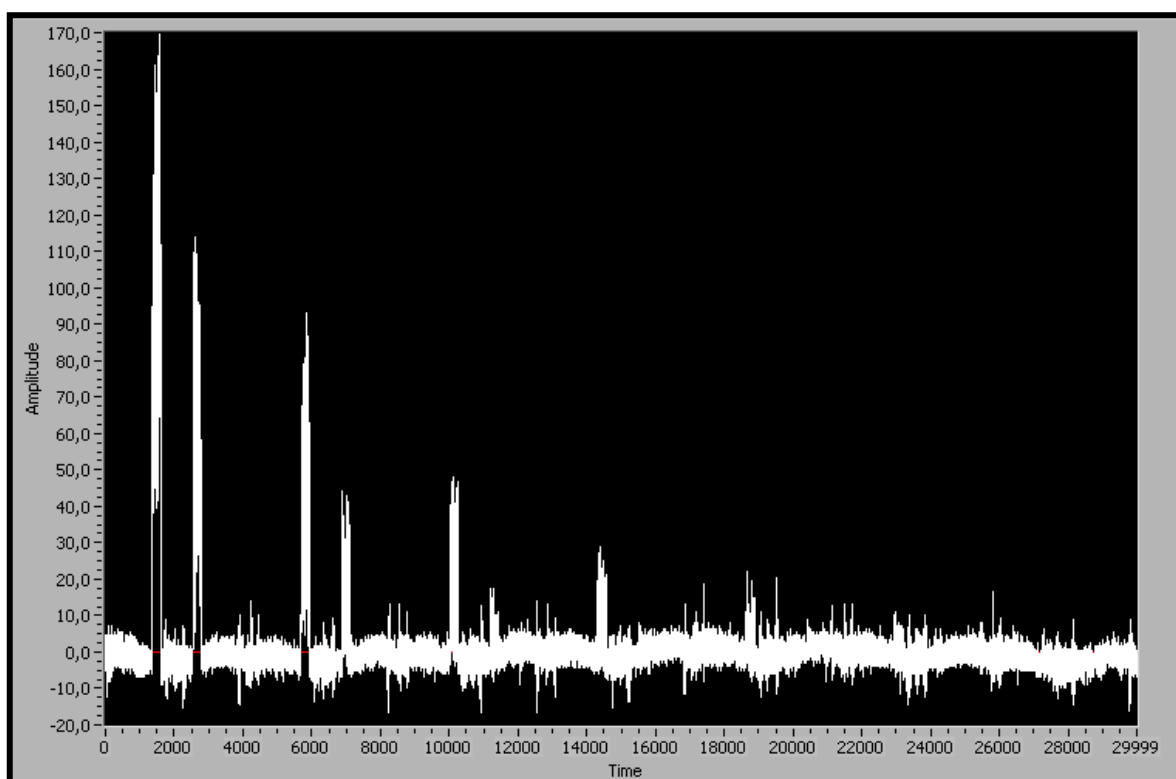
Záznam všech hodnot měřené řezné síly F_{CN} z dynamometru KISTLER při broušení materiálu **17 351** a použití procesní kapaliny **1.0E**.



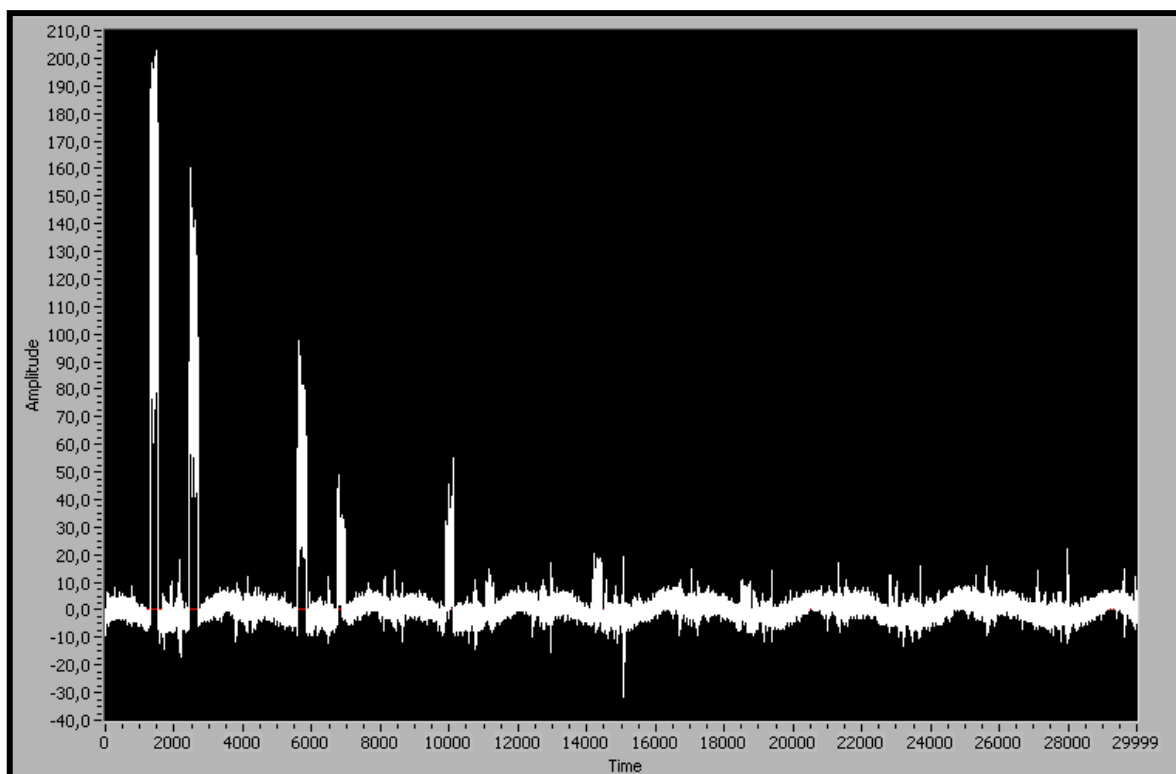
Záznam všech hodnot měřené řezné síly F_{CN} z dynamometru KISTLER při broušení materiálu **17 351** a použití procesní kapaliny **1.0F**.



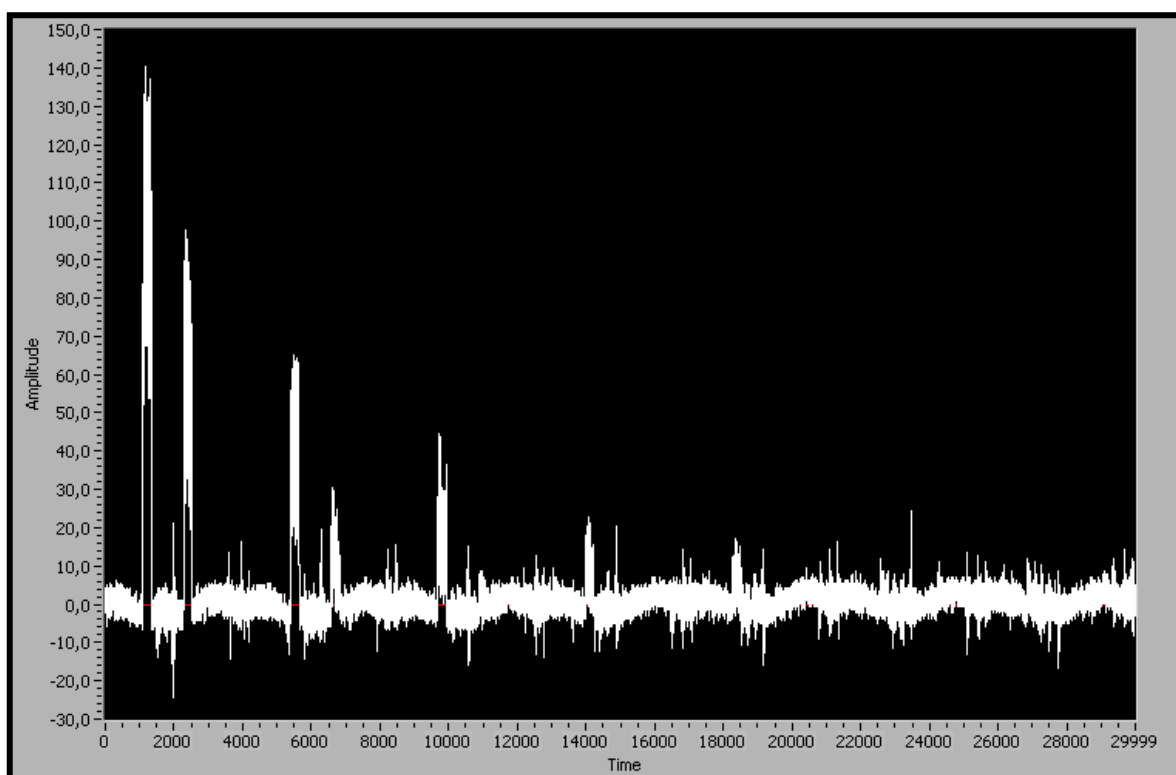
Záznam všech hodnot měřené řezné síly F_{CN} z dynamometru KISTLER při broušení materiálu **17 351** a použití procesní kapaliny **1.1B**.



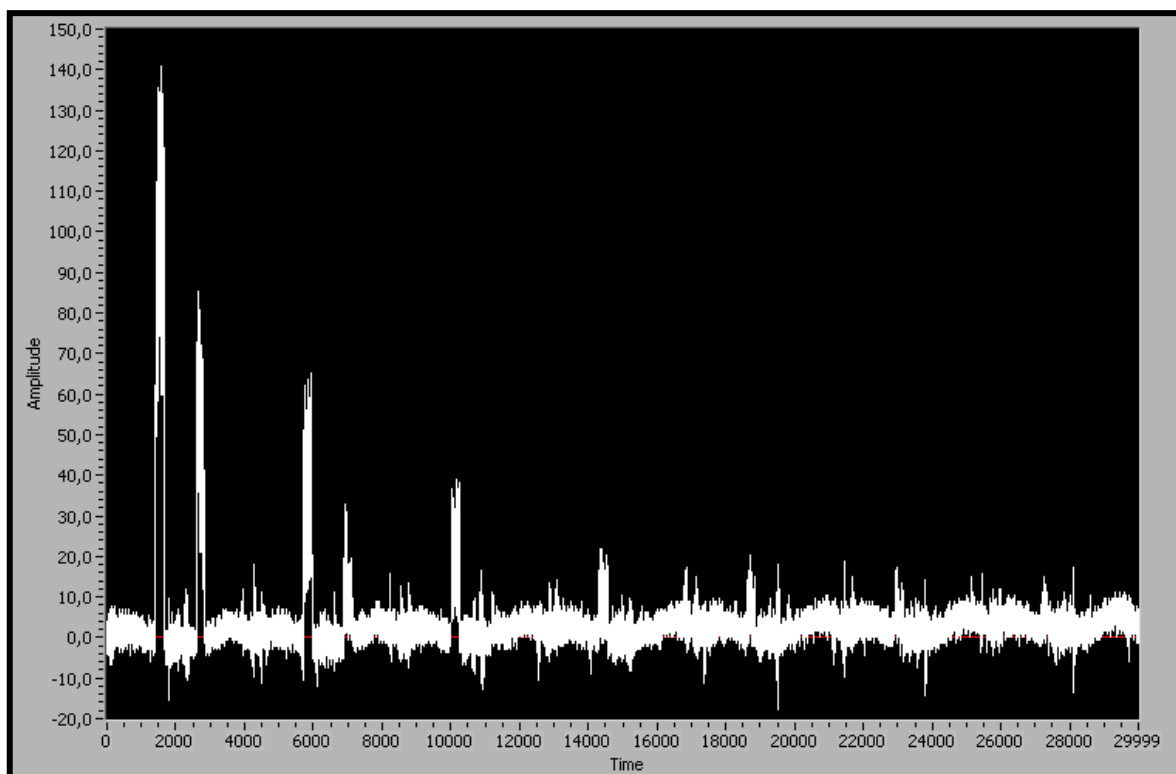
Záznam všech hodnot měřené řezné síly F_{CN} z dynamometru KISTLER při broušení materiálu **17 351** a použití procesní kapaliny **1.1D**.



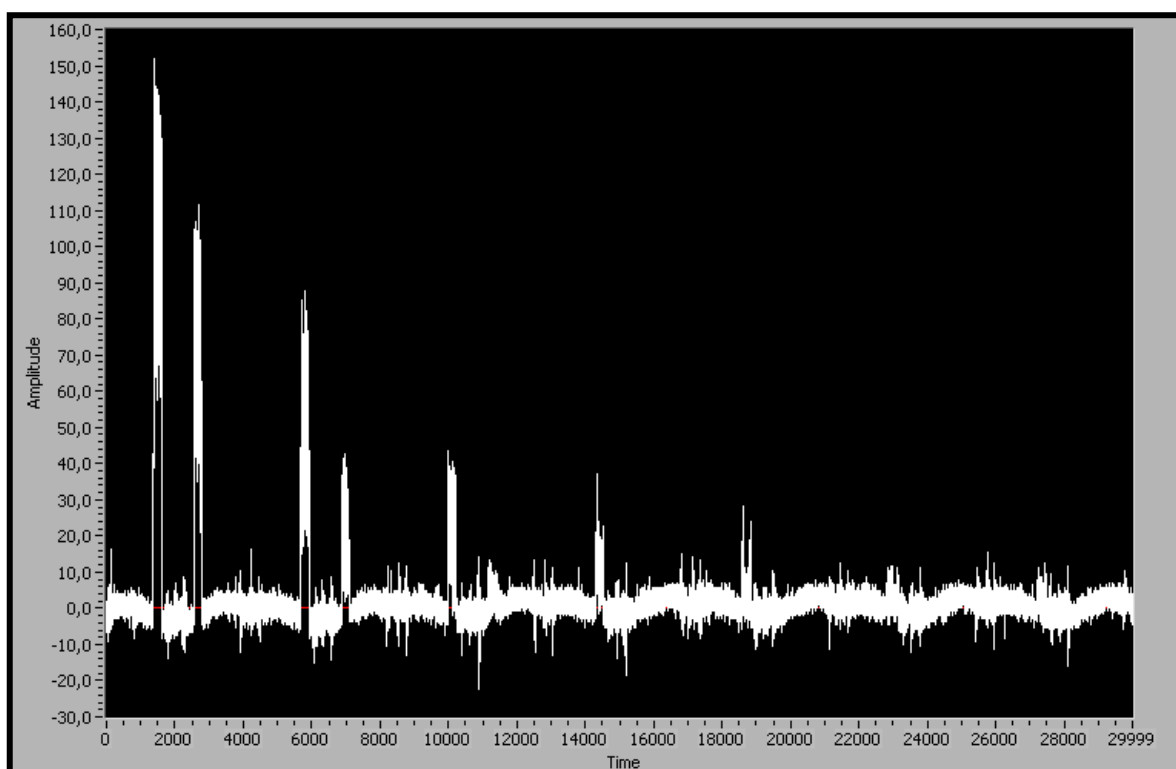
Záznam všech hodnot měřené řezné síly F_{CN} z dynamometru KISTLER při broušení materiálu **17 351** a použití procesní kapaliny **1.0D**.



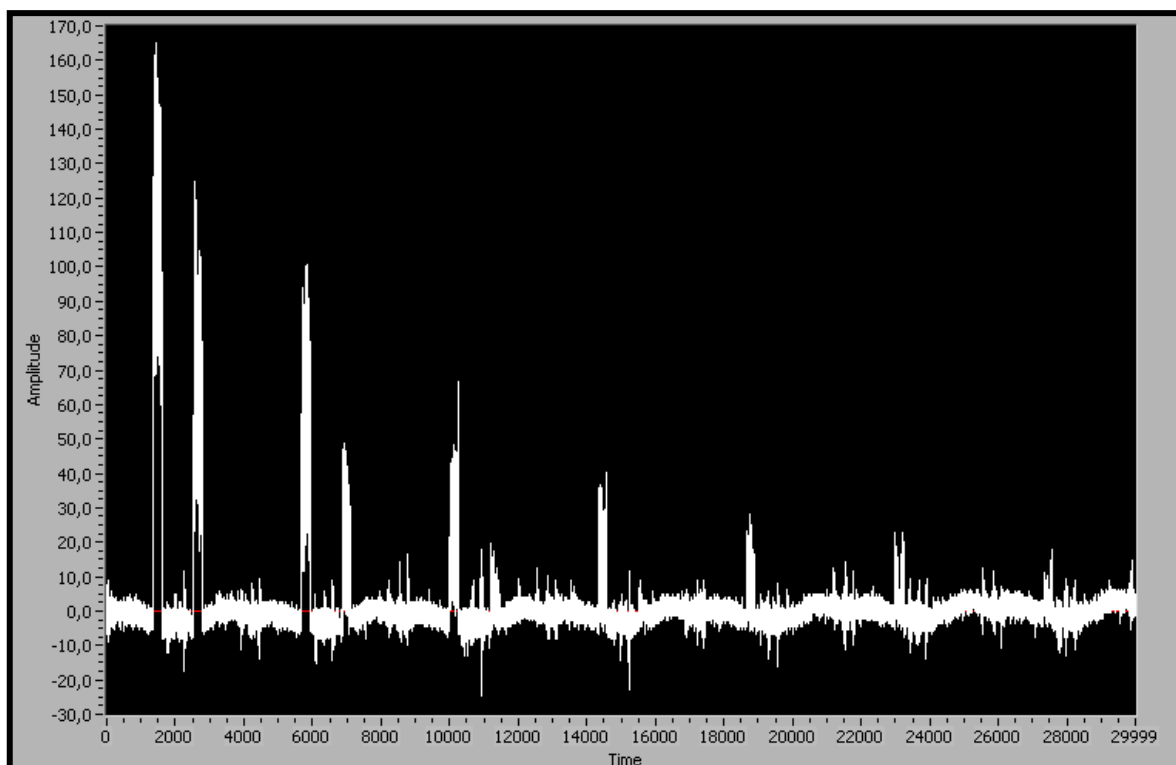
Záznam všech hodnot měřené řezné síly F_{CN} z dynamometru KISTLER při broušení materiálu **17 351** a použití procesní kapaliny **EOPS 1030**.



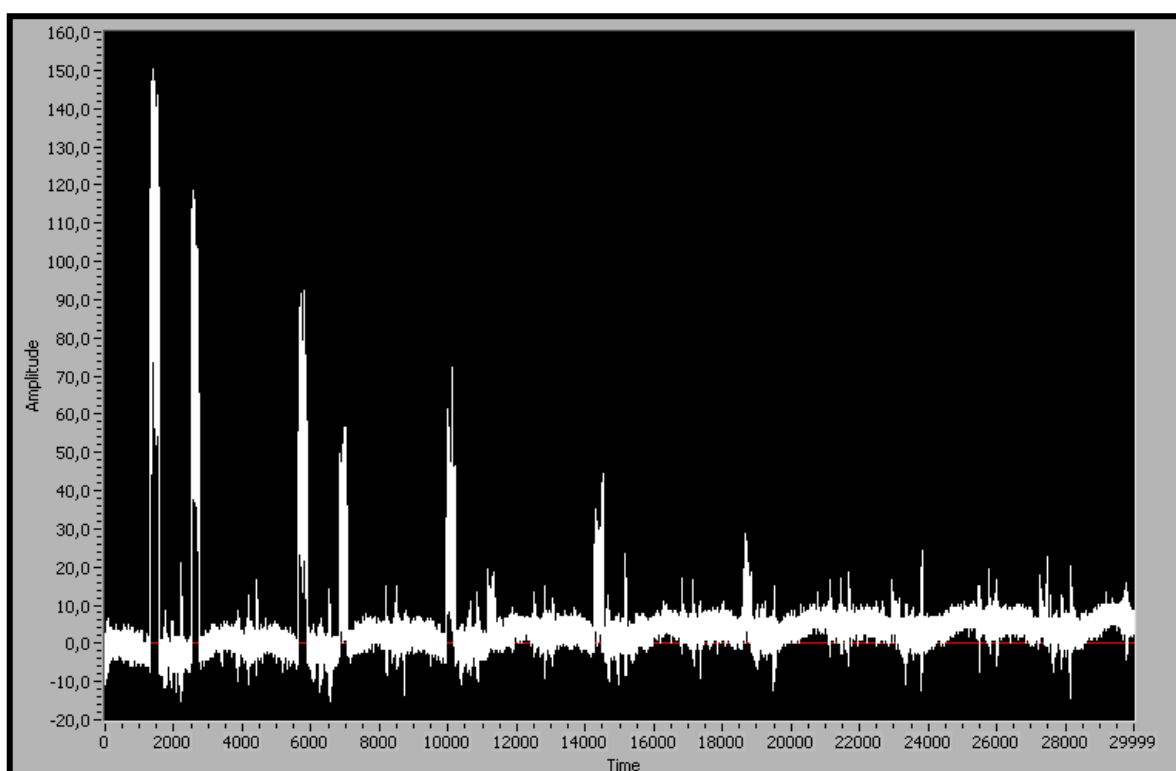
Záznam všech hodnot měřené řezné síly F_{CN} z dynamometru KISTLER při broušení materiálu **17 351** a použití procesní kapaliny **Hocut 795B**.



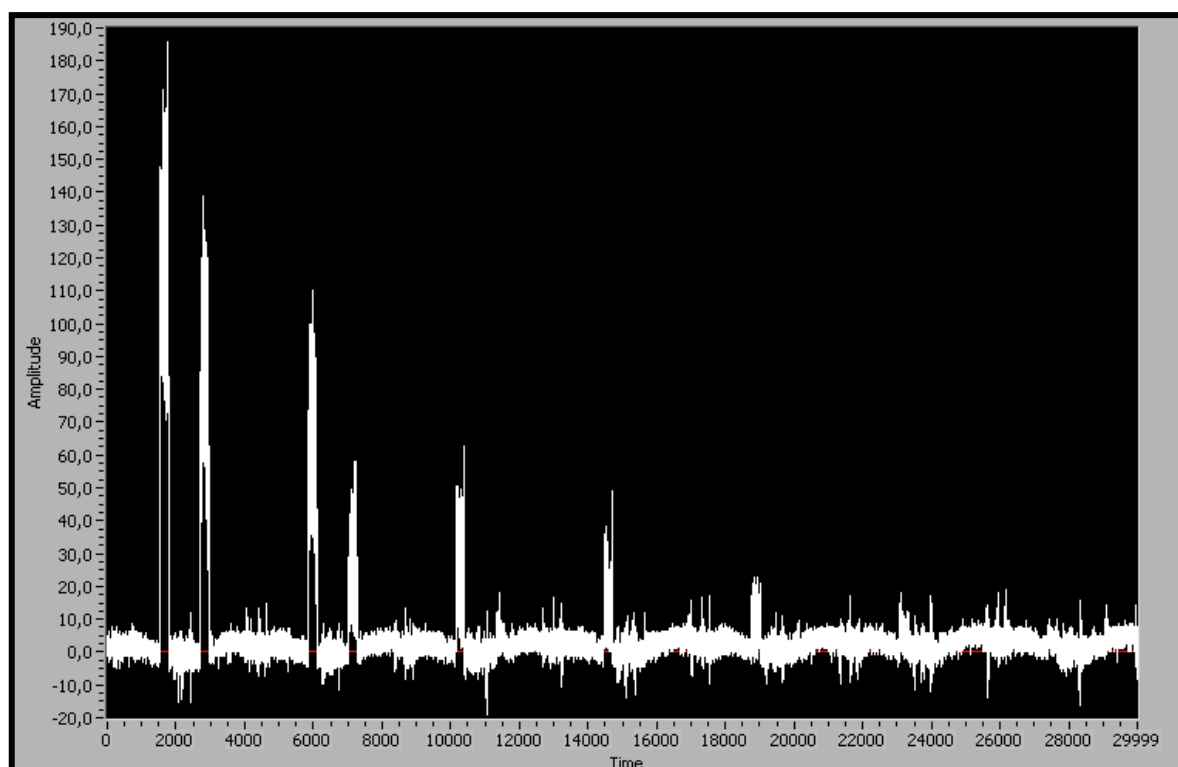
Záznam všech hodnot měřené řezné síly F_{CN} z dynamometru KISTLER při broušení materiálu **17 351** a použití procesní kapaliny **Blasocut BC 35 Kombi**.



Záznam všech hodnot měřené řezné síly F_{CN} z dynamometru KISTLER při broušení materiálu 17 351 a použití procesní kapaliny **Vasco 1000**.



Záznam všech hodnot měřené řezné síly F_{CN} z dynamometru KISTLER při broušení materiálu 17 351 a použití procesní kapaliny **Grindex 10**.



Záznam všech hodnot měřené řezné síly F_{CN} z dynamometru KISTLER při broušení materiálu **17 351** a použití procesní kapaliny **Cimstar 620**.

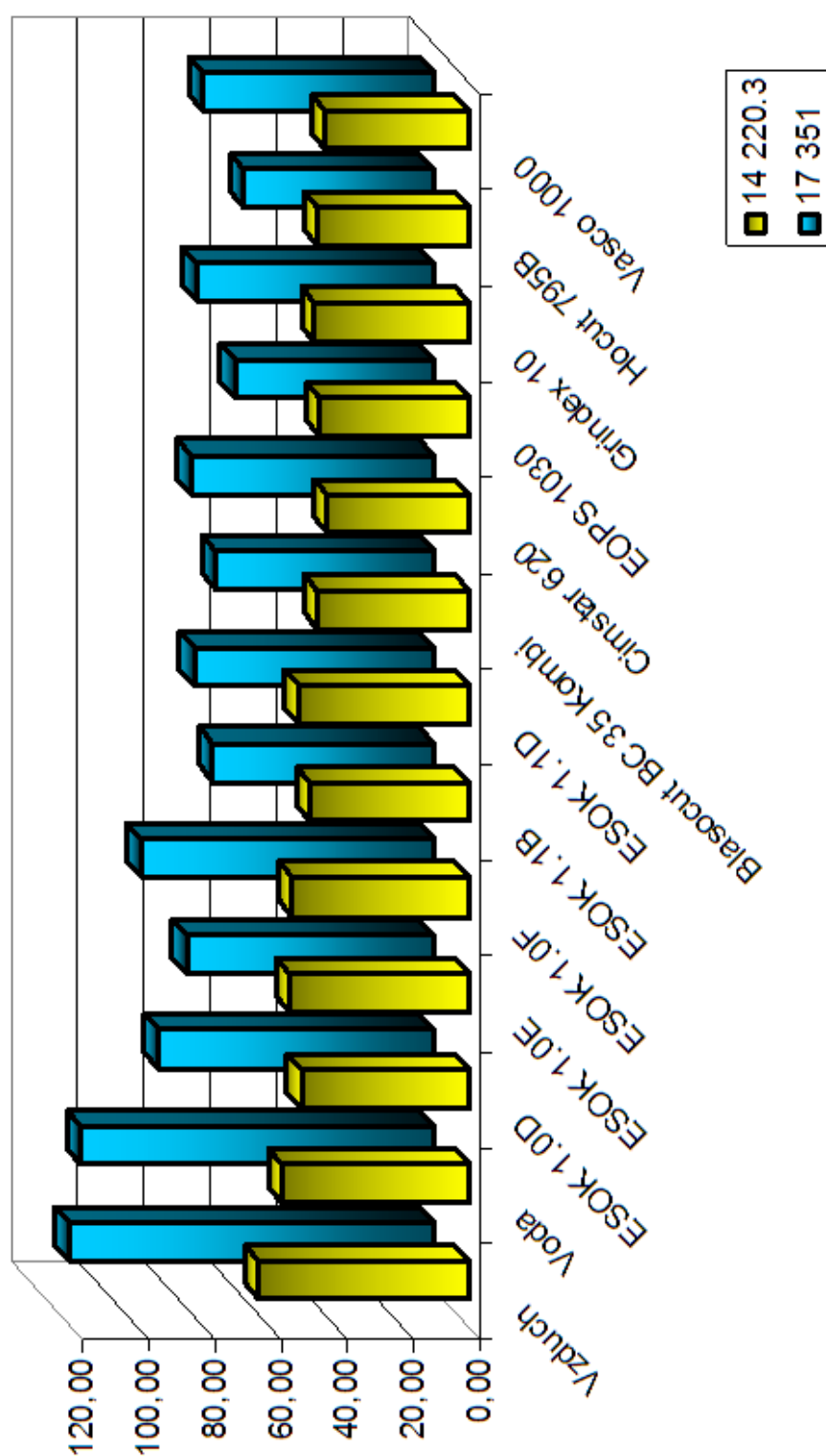
14 220.3	Za sucha			Voda			1.0D			1.0E			1.0F			1.1B			1.1D		
	Ra	Rz	CTP60	Ra	Rz	CTP60	Ra	Rz	CTP60	Ra	Rz	CTP60	Ra	Rz	CTP60	Ra	Rz	CTP60	Ra	Rz	CTP60
	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]
Číslo měření																					
1	0,45	3,36	2,31	0,35	2,48	1,46	0,37	2,65	1,54	0,35	2,39	1,56	0,40	2,76	1,55	0,34	2,73	1,55	0,42	2,92	1,13
2	0,48	3,42	2,47	0,46	3,21	2,17	0,33	2,40	1,13	0,37	2,59	1,36	0,36	2,73	1,39	0,41	3,91	2,00	0,32	2,49	1,21
3	0,48	3,58	2,54	0,48	3,58	1,98	0,36	2,48	1,60	0,38	3,23	1,18	0,35	2,58	1,18	0,35	2,55	1,03	0,35	2,45	1,18
4	0,49	4,07	3,68	0,39	3,20	1,53	0,40	2,95	1,57	0,34	2,88	1,32	0,36	2,75	1,29	0,37	2,46	1,16	0,39	3,19	1,33
5	0,51	4,11	2,22	0,41	2,84	2,13	0,39	2,60	1,42	0,34	2,30	1,16	0,35	2,63	1,06	0,33	2,58	1,10	0,37	3,25	1,52
6	0,51	4,10	2,90	0,40	2,87	1,81	0,34	2,86	1,58	0,34	2,74	1,18	0,35	2,32	1,18	0,35	2,82	2,15	0,34	2,30	1,20
7	0,51	3,67	3,09	0,35	2,87	1,92	0,36	2,52	1,34	0,31	2,34	1,37	0,34	2,54	1,37	0,38	2,77	1,24	0,38	2,95	1,48
8	0,45	2,93	2,16	0,38	3,01	1,81	0,33	2,13	1,07	0,35	2,46	1,26	0,30	2,35	1,30	0,32	2,44	1,21	0,31	2,53	1,20
9	0,44	3,29	2,20	0,39	2,73	3,34	0,36	2,42	1,53	0,38	2,52	1,29	0,39	2,67	1,40	0,33	2,35	1,20	0,40	2,24	1,28
10	0,44	2,95	2,81	0,38	2,66	1,75	0,38	2,77	1,35	0,36	2,28	1,42	0,36	2,48	1,42	0,41	4,10	1,66	0,35	2,53	1,15
průměr	0,48	3,55	2,64	0,40	2,94	1,99	0,36	2,58	1,41	0,35	2,57	1,31	0,36	2,58	1,31	0,36	2,87	1,43	0,36	2,68	1,27
(+,-)	0,02	0,33	0,37	0,03	0,24	0,40	0,02	0,18	0,14	0,02	0,23	0,09	0,02	0,12	0,11	0,02	0,47	0,30	0,03	0,27	0,10

14 220.3	Blasocut BC 35 Kombi			Cimstar 620			EOPS 1030			Grindex 10			Hocut 795B			Vasco 1000		
	Ra	Rz	σ _{TP60}	Ra	Rz	σ _{TP60}	Ra	Rz	σ _{TP60}	Ra	Rz	σ _{TP60}	Ra	Rz	σ _{TP60}	Ra	Rz	σ _{TP60}
	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]
Číslo měření																		
1	0,37	2,91	1,89	0,34	2,37	1,77	0,32	2,25	1,22	0,42	3,44	2,53	0,38	2,83	1,79	0,34	2,46	1,52
2	0,57	3,69	2,48	0,35	2,78	1,52	0,33	2,60	1,42	0,33	2,74	2,03	0,38	2,53	1,33	0,36	2,51	1,39
3	0,42	3,43	2,40	0,38	2,56	1,38	0,32	2,17	1,17	0,30	2,40	1,26	0,39	2,96	1,42	0,34	2,56	1,78
4	0,39	2,97	1,49	0,35	2,58	1,46	0,34	2,49	1,44	0,32	2,50	1,40	0,33	2,58	1,26	0,36	2,61	1,36
5	0,32	2,58	1,26	0,36	2,37	1,30	0,35	2,38	1,18	0,40	3,21	1,36	0,41	2,83	1,74	0,39	2,77	1,56
6	0,37	3,34	3,78	0,37	2,73	1,41	0,34	2,76	1,41	0,39	2,60	1,29	0,34	2,40	1,26	0,34	2,55	1,41
7	0,35	2,72	1,76	0,32	2,41	1,29	0,38	2,55	1,37	0,34	2,46	1,02	0,35	2,66	1,24	0,31	2,35	2,14
8	0,43	2,77	1,90	0,35	2,60	1,63	0,35	2,17	1,21	0,31	2,34	1,49	0,37	2,62	1,40	0,38	2,62	1,98
9	0,36	2,35	1,18	0,36	2,62	1,50	0,30	2,11	1,40	0,32	2,50	1,18	0,42	2,93	1,55	0,37	2,77	1,51
10	0,35	2,49	1,64	0,40	3,40	1,62	0,35	2,17	1,07	0,34	2,41	1,54	0,36	3,17	2,35	0,32	2,39	1,29
průměr	0,39	2,92	1,98	0,36	2,64	1,49	0,34	2,36	1,29	0,34	2,66	1,51	0,37	2,75	1,53	0,35	2,56	1,59
(+,-)	0,05	0,33	0,57	0,02	0,23	0,12	0,02	0,17	0,10	0,03	0,28	0,34	0,02	0,18	0,26	0,02	0,11	0,21

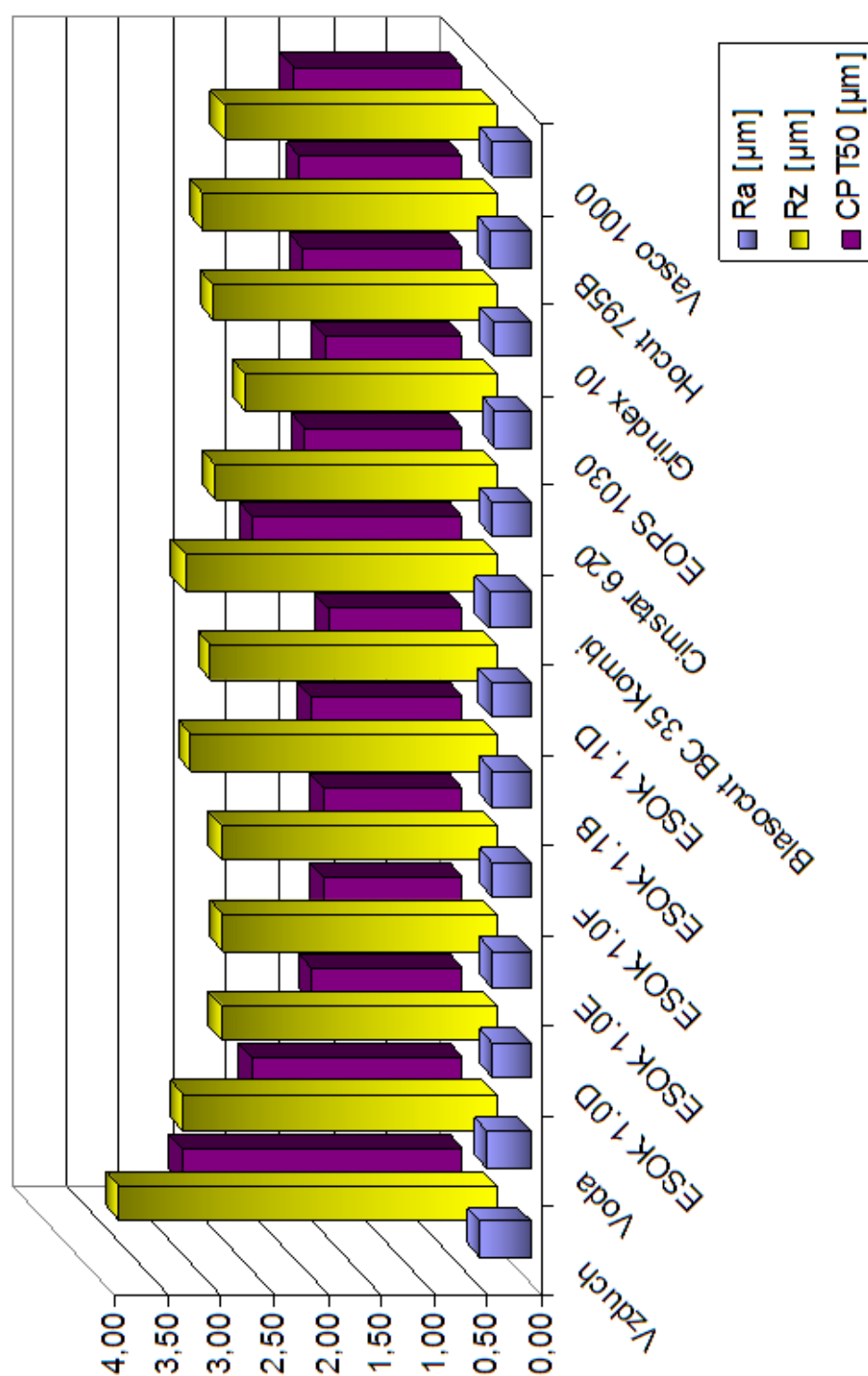
17 351	Za sucha			Voda			1.0D			1.0E			1.0F			1.1B			1.1D		
	Ra		Rz	Ra		Rz	Ra		Rz	Ra		Rz	Ra		Rz	Ra		Rz	Ra		Rz
	[μm]	CTP50	[μm]	[μm]	CTP50	[μm]	[μm]	CTP50	[μm]	[μm]	CTP50	[μm]	[μm]	CTP50	[μm]	[μm]	CTP50	[μm]	[μm]	CTP50	[μm]
Číslo měření																					
1	0,84	5,91	3,34	0,86	4,49	2,59	0,97	5,72	3,51	0,85	5,83	3,70	0,55	4,13	2,33	0,69	4,96	2,78	0,47	4,03	4,32
2	0,83	5,78	3,80	0,81	5,47	2,88	0,84	4,63	3,19	0,67	4,84	2,43	0,52	3,67	2,10	0,70	5,16	3,08	0,44	3,24	1,77
3	0,98	5,65	3,77	0,87	4,19	3,44	0,88	6,75	3,97	0,92	5,25	4,37	0,57	4,02	2,74	0,71	4,74	4,50	0,49	3,63	2,05
4	0,79	6,96	3,01	0,68	5,58	3,35	0,65	4,56	2,58	0,62	4,55	2,64	0,84	5,72	3,32	0,59	4,11	2,35	0,70	4,98	4,00
5	0,85	6,94	3,77	0,85	6,15	4,40	0,87	5,27	3,49	0,94	5,33	3,18	0,83	5,73	3,39	0,53	3,79	2,31	0,70	4,75	2,60
6	0,99	5,22	3,68	0,79	6,00	3,18	0,59	4,16	1,98	0,66	4,93	2,96	0,91	6,23	3,87	0,59	4,36	2,49	0,72	4,79	2,80
7	0,93	5,34	3,54	0,93	5,78	3,83	0,90	4,94	3,26	0,85	6,00	3,89	0,69	4,88	2,86	0,68	4,42	2,86	0,60	4,04	2,44
8	0,74	5,38	4,04	0,76	6,17	4,05	0,82	5,01	4,40	0,87	5,93	4,63	0,67	4,48	2,25	0,58	4,73	3,46	0,64	5,05	3,59
9	0,75	5,30	3,55	0,79	5,36	3,85	0,84	5,26	4,05	0,83	5,88	2,91	0,74	5,52	3,55	0,61	4,32	2,87	0,59	4,31	2,28
10	0,96	6,94	3,66	0,93	5,96	3,30	0,77	5,60	3,49	0,82	5,96	3,11	0,90	5,83	3,85	0,55	4,18	2,41	0,59	4,26	2,96
průměr	0,87	5,94	3,62	0,83	5,51	3,49	0,79	5,19	3,39	0,80	5,43	3,38	0,72	5,02	3,03	0,62	4,48	2,91	0,59	4,31	2,88
(+,-)	0,07	0,55	0,21	0,06	0,51	0,42	0,10	0,55	0,53	0,08	0,43	0,55	0,11	0,68	0,50	0,05	0,31	0,50	0,07	0,45	0,63

17 351	Blasocut BC 35 Kombi			Cimstar 620			EOPS 1030			Grindex 10			Hocut 795B			Vasco 1000		
	Ra		Rz	Ra		Rz	Ra		Rz	Ra		Rz	Ra		Rz	Ra		Rz
	[μm]	CTP50	[μm]	[μm]	CTP50	[μm]	[μm]	CTP50	[μm]	[μm]	CTP50	[μm]	[μm]	CTP50	[μm]	[μm]	CTP50	[μm]
Číslo měření																		
1	0,69	4,73	2,65	0,59	5,04	3,04	0,73	5,15	3,17	0,72	5,04	3,49	0,45	3,13	3,13	0,60	4,31	2,54
2	0,71	5,23	3,31	0,62	4,26	3,19	0,60	4,62	2,42	0,69	4,94	4,10	0,48	3,43	2,95	0,59	4,62	2,80
3	0,74	5,60	4,38	0,55	3,98	2,48	0,70	4,91	3,15	0,74	5,33	3,08	0,49	3,55	2,39	0,60	4,51	2,68
4	0,77	5,49	2,61	0,64	4,51	2,97	0,86	5,77	4,68	0,88	6,42	3,81	0,49	3,28	2,53	0,86	7,50	6,57
5	0,81	6,07	2,89	0,63	4,17	2,74	0,84	6,23	3,66	0,88	6,15	3,75	0,46	3,34	2,32	0,78	5,59	2,78
6	0,81	5,71	3,98	0,57	4,21	2,42	0,83	5,77	3,12	0,76	5,60	3,04	0,48	3,23	2,42	0,90	6,66	6,04
7	0,79	5,82	3,93	0,61	4,24	2,83	0,87	5,42	3,53	0,81	5,88	3,94	0,53	3,55	2,28	0,71	5,34	2,88
8	0,72	4,58	2,56	0,61	4,60	3,19	0,81	5,63	2,91	0,72	5,05	2,71	0,51	3,71	2,37	0,74	5,66	2,61
9	0,75	5,56	4,10	0,59	4,16	2,28	0,74	5,32	3,22	0,83	5,75	3,03	0,50	3,71	2,56	0,71	5,02	2,45
10	0,64	4,49	2,87	0,54	3,88	3,25	0,68	5,45	2,44	0,68	4,91	3,85	0,59	4,97	2,98	0,72	5,01	2,79
průměr	0,74	5,31	3,33	0,59	4,31	2,84	0,77	5,43	3,23	0,77	5,51	3,48	0,50	3,59	2,59	0,72	5,42	3,41
(+,-)	0,10	0,59	0,84	0,02	0,25	0,26	0,07	0,35	0,49	0,06	0,40	0,36	0,03	0,39	0,23	0,08	0,75	1,16

**Dosažené střední smluvní řezné síly F_{SCN} [N]
při broušení materiálů 14 220.3 a 17 351**



Dosažené drsnosti při broušení materiálu 14 220.3



Dosažené drsnosti při broušení materiálu 17 351

